

УДК 621.396.677

## ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК, СИНТЕЗИРОВАННЫЕ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ

### THE DIRECTIVITY PATTERN OF THE CYLINDRICAL ANTENNA ARRAYS SYNTHESIZED BY DIFFERENT METHODS

**М. О. Бусел,**

инженер кафедры информационно-вычислительных систем, магистр техн. наук Военной академии Республики Беларусь, г. Минск, Республика Беларусь

**А. А. Калинин,**

начальник сектора СКБ-4 НПО «ТСП», канд. техн. наук, доцент, г. Минск, Республика Беларусь

**А. Г. Романович,**

доцент кафедры информационных радиотехнологий БГУИР, канд. техн. наук, доцент, г. Минск, Республика Беларусь

**M. Busel,**

Engineer of Chair of information and computing systems of the Military Academy of the Republic of Belarus, magister of technical science, Minsk, Republic of Belarus

**A. Kalinin,**

Head of Scientific research sector SKB-4 in SPLLC "OKB TSP", PhD, Associate Professor, Minsk, Republic of Belarus

**A. Romanovich,**

Associate Professor of the Department of information radio technologies of the BSUIR, PhD, Associate Professor, Minsk, Republic of Belarus

Дата поступления в редакцию — 28.01.2019 г.

В статье приводятся результаты синтеза цилиндрической антенной решетки с пониженным уровнем кроссполяризации компоненты поля излучения. Проведено сравнение полученных результатов с описанными в литературе. Проведены расчеты значений коэффициентов направленного действия цилиндрических антенных решеток с различными видами амплитудно-фазового распределения возбуждающего воздействия.

The article presents the results of the synthesis of a cylindrical array with a reduced level of the cross-polarization component of the radiation field. The results are compared with those described in the literature. Calculations of the directional coefficients of cylindrical arrays with different types of amplitude-phase distribution of the exciting action are carried out.

Ключевые слова: кроссполяризация, цилиндрическая антенная решетка, конформная антенная решетка.

Keywords: crosspolarization, cylindrical array, conformal array.

#### *Введение.*

Метод синтеза конформных антенных решеток (КАР) с пониженным уровнем кроссполяризации компоненты поля излучения разработан и описан в работе [1]. В качестве элемента решетки используется излучатель с двумя входами, формирующий поле с взаимно ортогональной линейной поляризацией. Такой излучатель позволяет получить волну эллиптической поляризации с заданными параметрами поляризации [2, 3]. Необходимость использования такого излучателя показана в работе [4]. В литературе представлено незначительное количество работ по результатам синтеза КАР различными методами. Наиболее близкой по решаемым задачам является работа [5], поэтому в данной статье проводится сравнение результатов синтеза КАР, синтезированных описанными в [1] и [5] методами. В статье [5] описан метод синтеза КАР с низким уровнем кроссполяризованного излучения, учитывающий эффект взаимного влияния элементов на проводящей поверхности.

В ходе синтеза к диаграмме направленности (ДН) антенной решетки задавались следующие требования: уровень бокового излучения на основной составляющей поляризации и уровень кроссполяризованного излучения. Одной из рассматриваемых антенных решеток являлась цилиндрическая антенная решетка (ЦАР). Излучатели на цилиндрической поверхности размещены в узлах строк

и столбцов, то есть в узлах прямоугольной сетки. Прямоугольная сетка удобна для применения, в основном, на цилиндрической поверхности, что не характерно для сферической и конической поверхностей [6].

*Постановка задачи.*

Данная статья преследует следующие цели:

– оценку возможности синтеза ЦАР с пониженным уровнем кроссполяризационной компоненты поля излучения в соответствии с требованиями к двум взаимно ортогональным компонентам поля излучения антенной решетки, представленными в работе [5], а также возможность получения более низких уровней боковых лепестков ДН на основной компоненте поля и кроссполяризационного излучения решетки;

– исследование коэффициентов направленного действия  $D$  (КНД) ЦАР при расчете амплитудно-фазового распределения (АФР) на основании метода синтеза из работы [1], а также КНД  $D$  цилиндрической антенной решетки с равномерным амплитудным распределением и фазовым распределением, компенсирующим набеги фаз с учетом кривизны цилиндрической поверхности.

*Основная часть.*

Излучатели конформных антенных решеток часто располагаются на различных выпуклых поверхностях, например сферических, цилиндрических и других поверхностях более сложной формы. Метод синтеза по возбуждению сферической антенной решетки при формировании требуемой векторной комплексной ДН представлен в работах [1, 4]. Рассмотрим антенную решетку на цилиндрической поверхности с прямоугольным размещением излучателей, описанную в статье [5]. Конструкция ЦАР изображена на рис. 1. Она представляет собой систему из  $N$  излучателей, расположенных на поверхности радиуса  $R$  и высоты  $H$ . В качестве модели элемента решетки используем модель излучателя с эллиптической поляризацией и заданными значениями параметров поляризации, разработанную на основе элемента Гюйгенса и описанную в [2, 3]. Такой излучатель имеет следующие свойства:

- осесимметричная диаграмма направленности;
- диаграмма направленности близка к ДН излучателей, находящихся над проводящей поверхностью, а также ДН апертурных излучателей;
- модель требует минимального количества вычислительных затрат.

В соответствии с изложенным в работе [1] методом синтеза конформных антенных решеток функция  $\dot{F}_{\text{ТР}}(\theta, \varphi)$ , характеризующая требуемую ДН, раскладывается в ряд Фурье по системе базисных

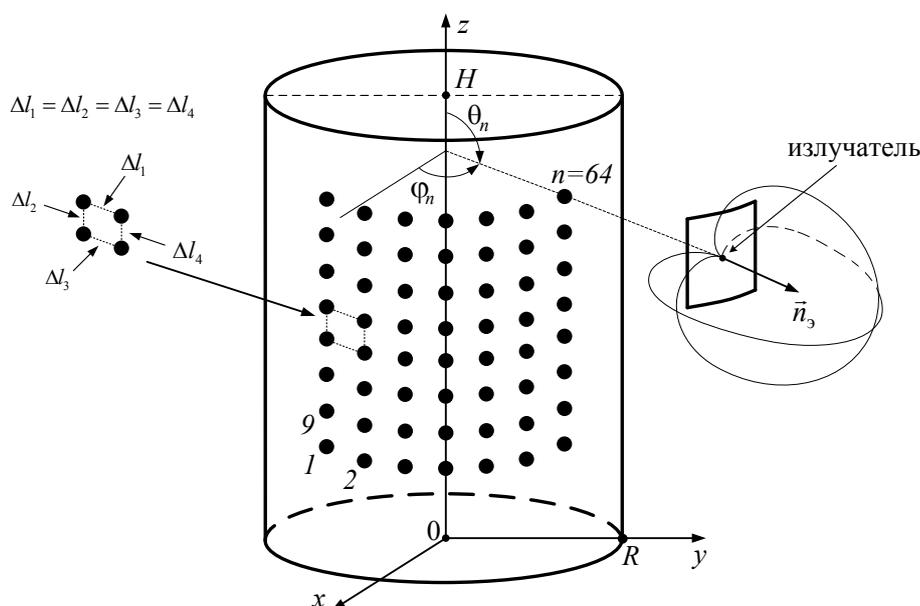


Рис. 1. Конструкция цилиндрической антенной решетки

функций, а задача синтеза ЦАР решается путем отыскания комплексных коэффициентов разложения  $\dot{a}_{l,s}^{\text{OCH}}$  ( $\dot{a}_{l,s}^{\text{КОМП}}$ ) и  $\dot{b}_{l,s}^{\text{OCH}}$  ( $\dot{b}_{l,s}^{\text{КОМП}}$ ):

$$\vec{F}_{\text{ТР}}(\theta, \varphi) = \sum_{s=0}^S \sum_{l=0}^L \left\{ \left( \dot{a}_{l,s}^{\text{OCH}} + \dot{a}_{l,s}^{\text{КОМП}} \right) \left( \dot{Z}_{l,s}^{\text{OCH}}(\theta, \varphi) + \dot{Z}_{l,s}^{\text{КОМП}}(\theta, \varphi) \right) + \left( \dot{b}_{l,s}^{\text{OCH}} + \dot{b}_{l,s}^{\text{КОМП}} \right) \left( \dot{Z}_{l,s}^{\text{OCH}}(\theta, \varphi) + \dot{Z}_{l,s}^{\text{КОМП}}(\theta, \varphi) \right) \right\}, \quad (1)$$

где  $\dot{Z}_{l,s}^{\text{OCH}}(\theta, \varphi)$ ,  $(\dot{Z}_{l,s}^{\text{КОМП}}(\theta, \varphi))$ ,  $\dot{Z}_{l,s}^{\text{OCH}}(\theta, \varphi)$ ,  $(\dot{Z}_{l,s}^{\text{КОМП}}(\theta, \varphi))$  — базисные функции для основного (компенсационного) входа излучателя [1]:

$$\dot{Z}_{l,s}^{\text{OCH}}(\theta, \varphi) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left\{ F_{1\theta n}^{\text{OCH}}(\theta, \varphi) \left( p_n^\theta(\theta, \varphi) + p_n^\varphi(\theta, \varphi) \right) S_{l,s}[\theta_n, \varphi_n] e^{-iO_n(\theta, \varphi)} \right\}; \quad (2)$$

$$\dot{Z}_{l,s}^{\text{OCH}}(\theta, \varphi) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left\{ F_{1\theta n}^{\text{OCH}}(\theta, \varphi) \left( p_n^\theta(\theta, \varphi) + p_n^\varphi(\theta, \varphi) \right) C_{l,s}[\theta_n, \varphi_n] e^{-iO_n(\theta, \varphi)} \right\}; \quad (3)$$

$$\dot{Z}_{l,s}^{\text{КОМП}}(\theta, \varphi) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left\{ F_{1\theta n}^{\text{КОМП}}(\theta, \varphi) \left( p_n^\theta(\theta, \varphi) + p_n^\varphi(\theta, \varphi) \right) S_{l,s}[\theta_n, \varphi_n] e^{-iO_n(\theta, \varphi)} \right\}; \quad (4)$$

$$\dot{Z}_{l,s}^{\text{КОМП}}(\theta, \varphi) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left\{ F_{1\theta n}^{\text{КОМП}}(\theta, \varphi) \left( p_n^\theta(\theta, \varphi) + p_n^\varphi(\theta, \varphi) \right) C_{l,s}[\theta_n, \varphi_n] e^{-iO_n(\theta, \varphi)} \right\}; \quad (5)$$

где  $F_{1\theta n}^{\text{OCH}}(\theta, \varphi)$  ( $F_{1\theta n}^{\text{КОМП}}(\theta, \varphi)$ ) — ДН  $n$ -го излучателя по  $\theta$ -й компоненте при возбуждении его основного (компенсационного) входа соответственно;  $p_n^\theta(\theta, \varphi)$  ( $p_n^\varphi(\theta, \varphi)$ ) — проекции поляризационного вектора  $n$ -го излучателя на  $\theta$ -ю ( $\varphi$ -ю) компоненты соответственно;  $S_{l,s}[\theta_n, \varphi_n]$  ( $C_{l,s}[\theta_n, \varphi_n]$ ) — функции разложения [1];  $O_n(\theta, \varphi)$  — набег фазы поля  $n$ -го излучателя при распространении волны до точки дальней зоны; для случая сферической системы координат определяется выражением:

$$O_n(\theta, \varphi) = \frac{2\pi}{\lambda} (x_n \sin \theta \cos \varphi + y_n \sin \theta \sin \varphi + z_n \cos \theta), \quad (6)$$

где  $\lambda$  — длина волны;  $x_n, y_n, z_n$  — декартовы координаты  $n$ -го излучателя.

В статье рассматривается ЦАР с линейной вертикальной поляризацией, излучатели которой размещаются в узлах прямоугольной сетки ( $\Delta l \approx 0,561 \lambda$ ), радиус принят  $R = 2,5 \lambda$ , высота  $H = 4 R$  с активной областью, ограниченной телесным углом —  $2\theta_{\text{обл}} = 100^\circ$  (количество строк и столбцов 8). Основной компонентой поля принята  $\theta$ -я компонента. В качестве модели элемента решетки используем модель излучателя с эллиптической поляризацией и заданными значениями параметров поляризации, разработанную на основе элемента Гюйгенса и описанную в [2, 3].

Ниже приводится сравнение результатов синтеза описанной антенны с использованием двух методов синтеза [1] и [5]. Сравнение выполнялось по ДН по основным и кроссполяризационным компонентам поля излучения.

На рис. 2 (3) и 4 (5) изображены объемные диаграммы направленности ЦАР для основной и кроссполяризационной компонент поля в плоскостях  $\theta$  ( $\varphi$ ) соответственно. Для диаграммы направленности по основной ( $\theta$ -й) компоненте поля излучения требования, аналогичные требованиям из [5]:  $F_{\text{Б}} = F_{\text{ФБ}} = F_{\text{ФБ}} = -20$  дБ;  $2\theta_{0,5} = 18^\circ$ ;  $2\varphi_{0,5} = 18^\circ$ . Кроссполяризационная ДН не должна превышать уровень  $K^{\text{КРОСС}}(\theta, \varphi) = -30$  дБ. В работе [5] ширина главного лепестка по уровню половинной мощности не задавалась. Амплитудно-фазовое распределение, рассчитанное с использованием метода [1] по описанным выше требованиям к векторной комплексной ДН ЦАР, далее будем обозначать как АФР 1.

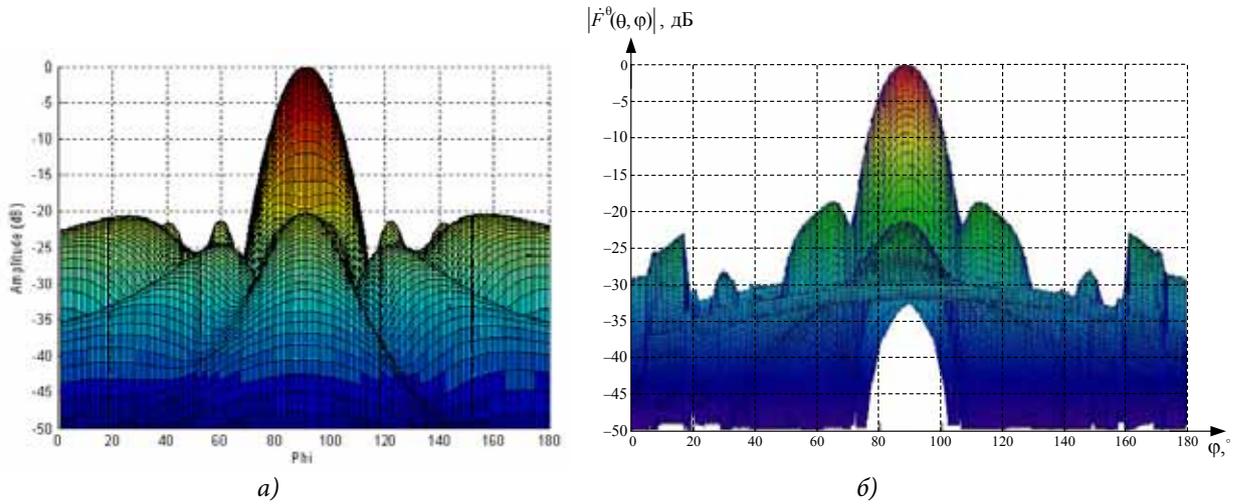


Рис. 2. ДН ЦАР по основной компоненте поля излучения в проекции на плоскость xOy на основании синтеза: а — работа [5]; б — работа [1] и данная статья

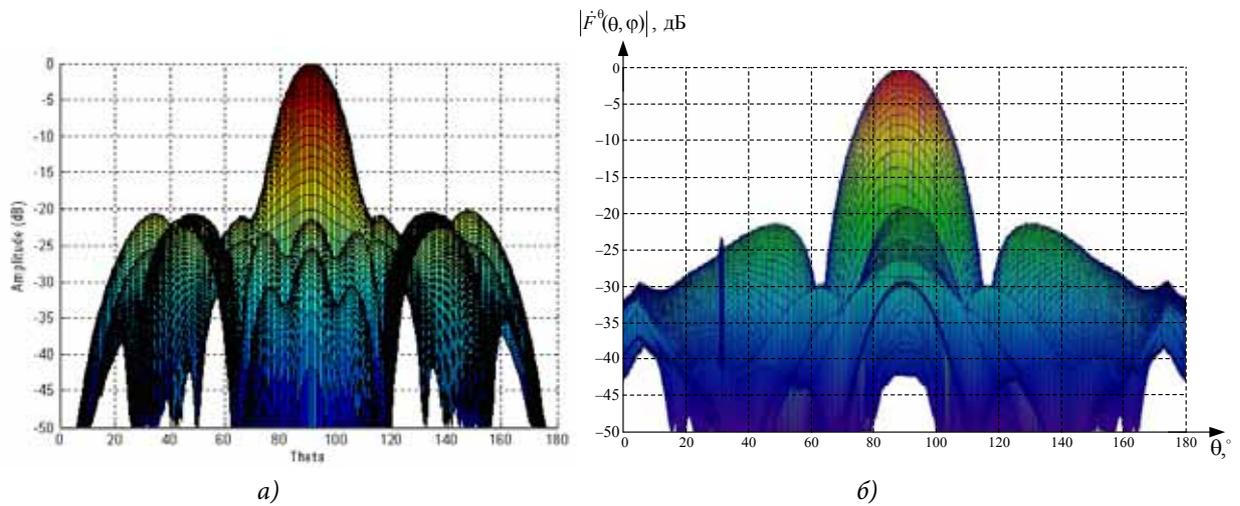


Рис. 3. ДН ЦАР по основной компоненте поля излучения в проекции на плоскость xOz на основании синтеза: а — работа [5]; б — работа [1] и данная статья

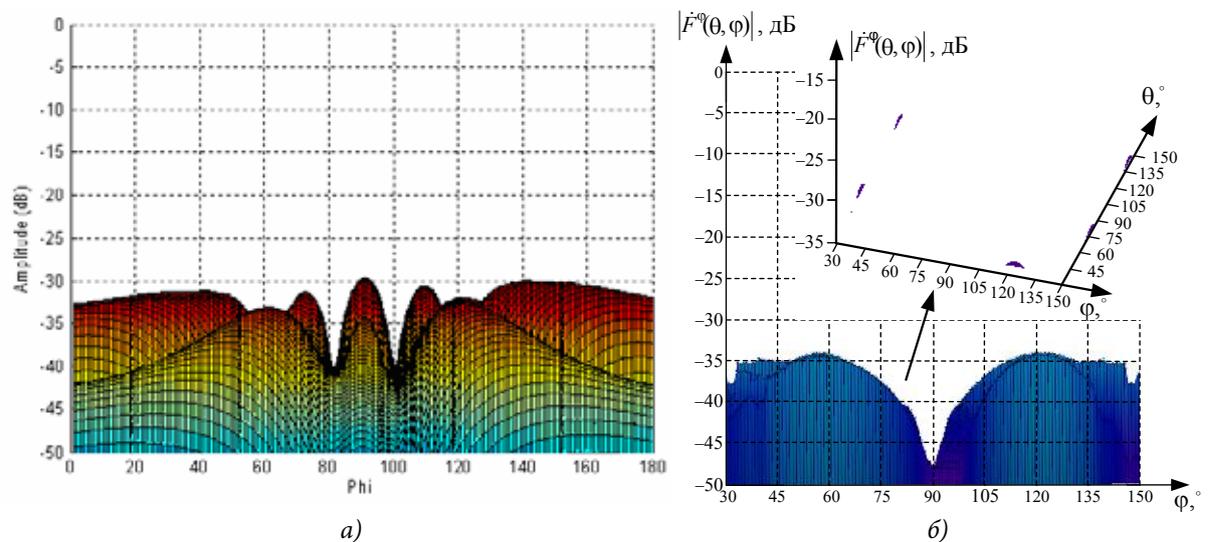


Рис. 4. ДН ЦАР по кроссполаризационной компоненте поля излучения в проекции на плоскость xOy на основании синтеза: а — работа [5]; б — работа [1] и данная статья

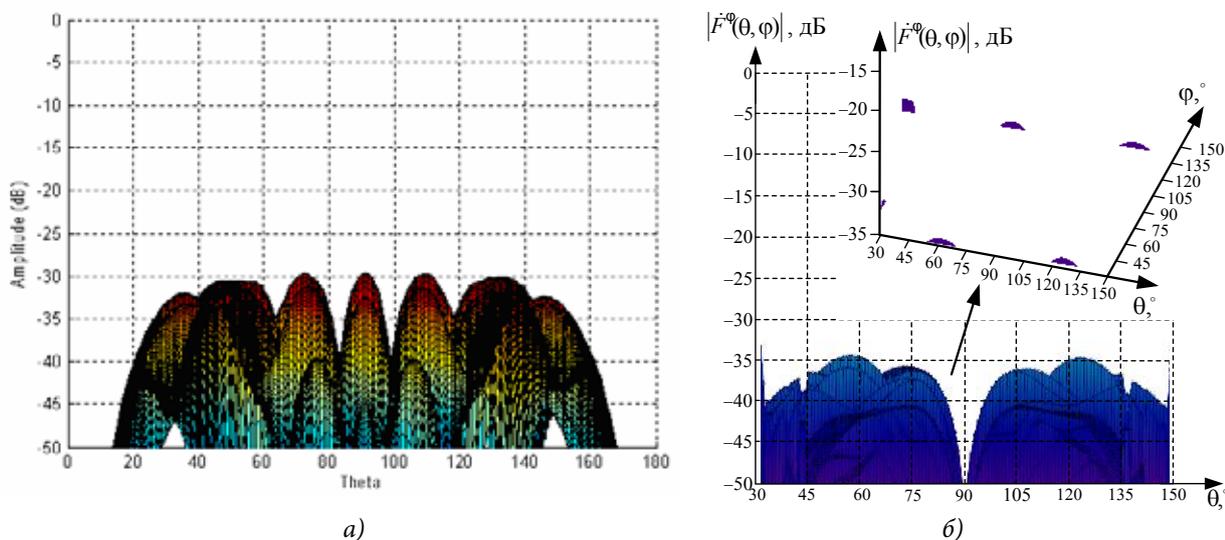


Рис. 5. ДН ЦАР по кроссполяризованной компоненте поля излучения в проекции на плоскость xOz на основании синтеза: а — работа [5]; б — работа [1]

Представленные ДН на рис. 2, а — 5, а заимствованы из [5]; а диаграммы направленности, изображенные на рис. 2, б — 5, б, рассчитаны по синтезированному АФР 1. Рассчитанное АФР 1 на основании метода [1] позволило сформировать ДН с заданными требованиями к двум взаимно ортогональным компонентам поля излучения решетки. При этом уровень кроссполяризованного излучения, показанного на рис. 4, б — 5, б, меньше примерно на 5 дБ относительно уровня кроссполяризованного излучения, приведенного на рис. 4, а — 5, а. Для проверки возможностей метода синтеза по формированию ДН с еще более низким уровнем кроссполяризованного излучения заданы следующие значения параметров:  $F_B = F_{\phi B} = F_{\theta B} = -25$  дБ;  $2\theta_{0,5} = 18^\circ$ ;  $2\phi_{0,5} = 18^\circ$ ;  $K^{КРОСС}(\theta, \phi) \leq -40$  дБ. Для данных значений параметров ДН на основании метода [1] рассчитано АФР 2 и соответствующие ДН для двух взаимно ортогональных компонент поля излучения представлены на рис. 6, 7.

Рис. 6, 7 демонстрируют возможности метода синтеза [1] по формированию ДН ЦАР с пониженным уровнем кроссполяризованной компоненты поля излучения. Кроссполяризованная ДН имеет уровень максимального излучения примерно -43 дБ в направлении главного лепестка ДН на основной составляющей поляризации. На основании кроссполяризованной ДН ЦАР можно считать, что метод [1] позволяет синтезировать ДН с уровнем кроссполяризованного излучения примерно на

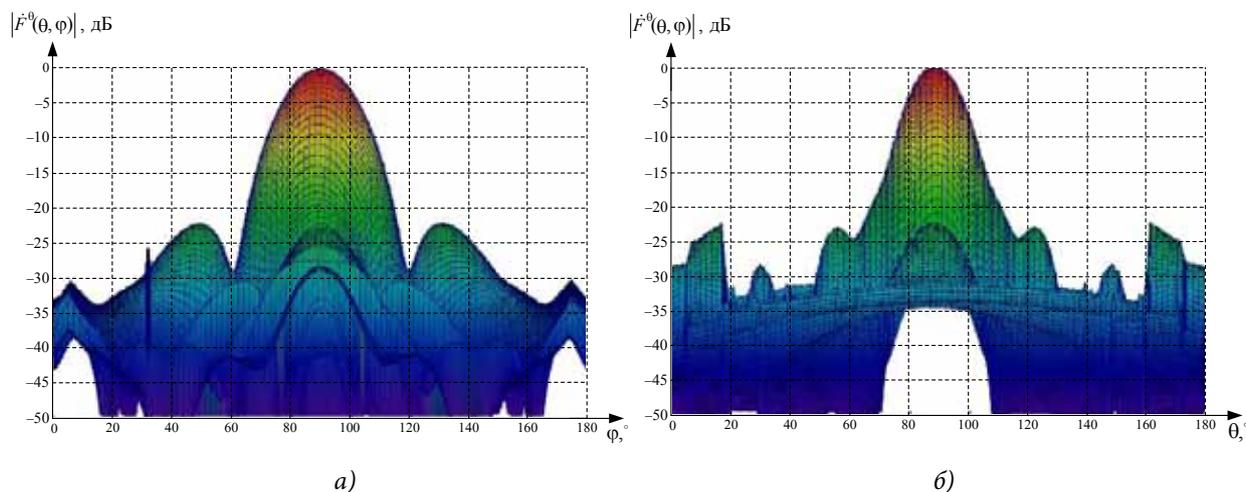


Рис. 6. ДН ЦАР по основной компоненте поля излучения в проекции: на а — плоскость xOu; б — плоскость xOz соответственно

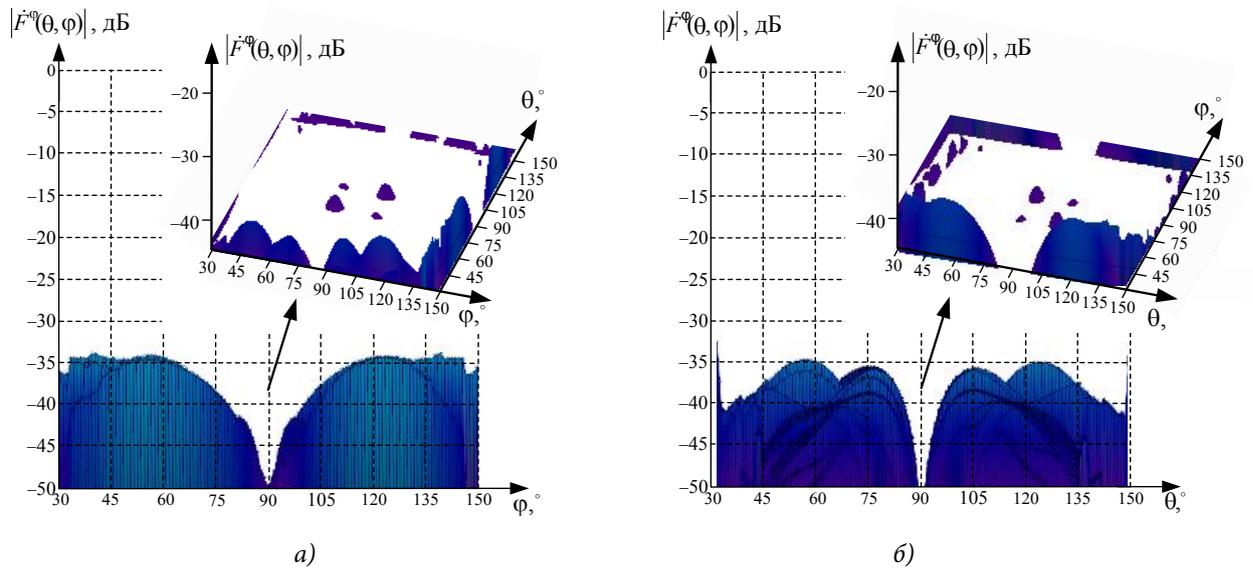


Рис. 7. ДН ЦАР по кроссполяризированной компоненте поля излучения в проекции: на *a* — плоскость *xoy*; *b* — плоскость *xoz* соответственно

13 дБ ниже, чем в работе [5]. Из рис. 6 видно, что уровень боковых лепестков на основной составляющей поляризации ниже примерно на 3 дБ, чем на ДН ЦАР, показанной в статье [5].

Для исследования коэффициентов направленного действия ЦАР рассмотрим три амплитудно-фазовых распределения. Диаграммы направленности ЦАР на основании АФР 1 и АФР 2 изображены выше. Обозначим через АФР 3 равномерное амплитудное распределение и фазовое распределение, учитывающее кривизну цилиндрической поверхности на активной области цилиндрической решетки. Диаграммы направленности ЦАР для двух взаимно ортогональных компонент поля излучения показаны на рис. 8, 9.

Из рис. 8, 9 видно, что уровень бокового излучения на основной составляющей поляризации составил приблизительно минус 12–14 дБ, уровень кроссполяризованного излучения — минус 23 дБ. Коэффициент направленного действия *D* ЦАР для трех типов АФР отражен в таблице.

Коэффициент направленного действия ЦАР в зависимости от АФР

Тип АФР	АФР1	АФР2	АФР3
D	137	120	210

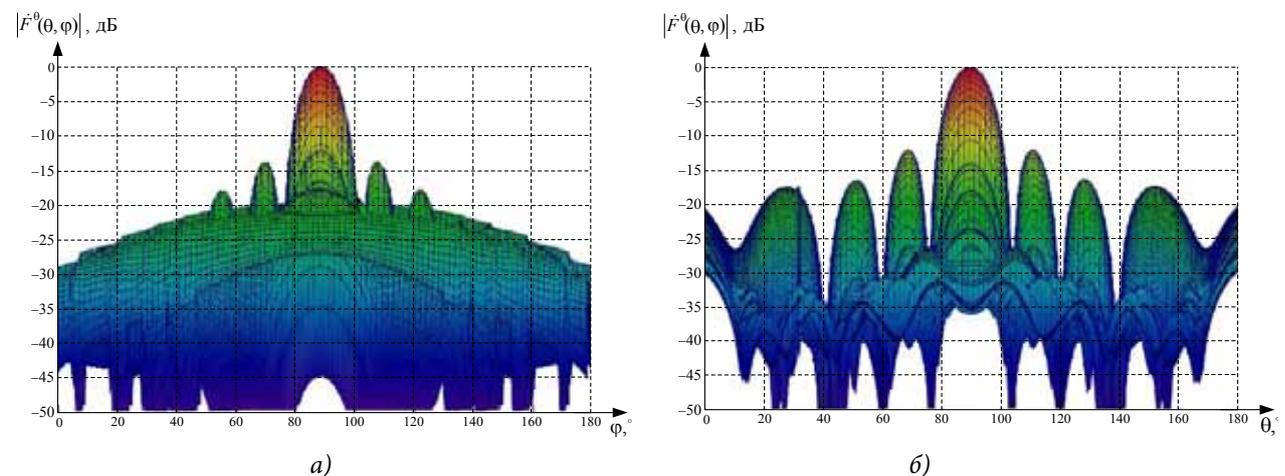


Рис. 8. ДН ЦАР по основной компоненте поля излучения при равномерном амплитудном распределении и фазовом распределении, учитывающим кривизну поверхности в проекции: на *a* — плоскость *xoy*; *b* — плоскость *xoz*

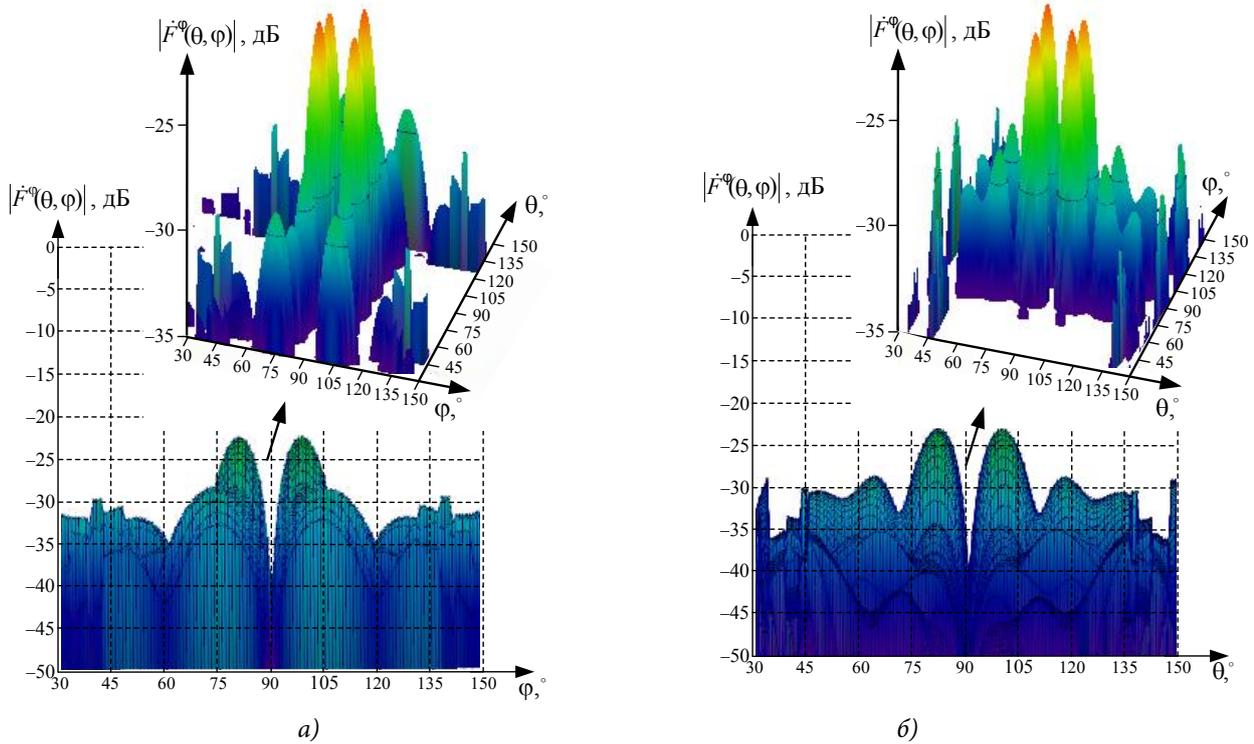


Рис. 9. ДН ЦАР по кроссполаризационной компоненте поля излучения при равномерном амплитудном распределении и фазовом распределении, учитывающим кривизну поверхности в проекции: на а — плоскость  $xoy$ ; б — плоскость  $xoz$

Результаты, представленные в таблице, показывают, что наибольший коэффициент направленного действия  $D$  ЦАР соответствует решетке, возбужденной равномерным амплитудным распределением и фазовым распределением, учитывающим кривизну цилиндрической поверхности. Наименьшее значение имеет КНД ЦАР при АФР2. Однако при этом при прочих равных условиях обеспечивается формирование ДН с уменьшенным приблизительно на 9–11 дБ уровне бокового излучения на основной составляющей поля излучения и пониженным примерно на 20 дБ уровне кроссполаризационного излучения. Использование антенн радиотехнических комплексов с подобными ДН может позволить улучшить помехозащищенность радиотехнических средств, увеличить мощность излучения на основной составляющей поляризации и ряд других свойств [6].

*Заключение.*

Таким образом, в статье приведены результаты численного моделирования цилиндрической антенной решетки. Оценена возможность синтеза ЦАР с пониженным уровнем кроссполаризационной компоненты поля излучения по сравнению с синтезированной в [5] антенной. Метод синтеза [1], учитывающий поляризационные свойства излучателей при решении задачи по нахождению амплитудно-фазового распределения и возбуждению основного и компенсационного входов излучателя, позволяет получить ДН ЦАР с пониженным уровнем кроссполаризационной компоненты поля излучения. Получены значения уровня кроссполаризационного излучения приблизительно на 13 дБ и уровня боковых лепестков на основной составляющей поляризации приблизительно на 3 дБ ниже, чем описанные в [5].

Проведено исследование КНД ЦАР для трех типов АФР. Анализ приведенных результатов показал:

- метод синтеза КАР с пониженным уровнем кроссполаризационной компоненты поля излучения позволил воспроизвести результаты, представленные в работе [5], а также получить выигрыш в уровне кроссполаризационного излучения приблизительно на 5 дБ;
- задание более жестких требований к векторной комплексной ДН ЦАР, чем в работе [5], позволяет снизить уровень кроссполаризационного излучения примерно на 13 дБ, уровень боковых лепестков на основной составляющей поляризации — приблизительно на 3 дБ;

– коэффициент направленного действия ЦАР имеет наибольшее значение при равномерном амплитудном распределении и фазовом распределении, компенсирующим набеги фаз с учетом кривизны цилиндрической поверхности, но при таком АФР уровень бокового излучения ДН на основной составляющей больше приблизительно на 9–11 дБ и уровень кроссполяризационного излучения больше приблизительно на 20 дБ, чем при АФР2.

Следует отметить, что метод синтеза КАР с пониженным уровнем кроссполяризационной компоненты поля излучения позволяет получить выигрыш как в уровне кроссполяризационного излучения (приблизительно на 13 дБ), так и в уровне боковых лепестков ДН на основной составляющей поляризации (приблизительно на 3 дБ) по сравнению с описанными в [5]. Результаты моделирования показывают эффективность метода [1].

#### Литература:

1. Бусел, М. О. Метод синтеза конформной антенной решетки с учетом поляризационных свойств излучателей / М. О. Бусел // Доклады БГУИР. — 2017. — № 5 (107). — С. 5–12.
2. Бусел, М. О. Математическая модель излучателя конформной антенной решетки с учетом его поляризационных свойств / М. О. Бусел, А. А. Калинин, А. Г. Романович // Сбор. науч. стат. Воен. акад. Респ. Бел. — 2016. — № 30. — С. 86–95.
3. Калинин, А. А. Математическая модель излучателя цилиндрической антенной решетки с учетом его поляризационных свойств / А. А. Калинин, М. О. Бусел, А. Г. Романович // Вест. Воен. акад. Респ. Бел. — 2014. — № 3 (44). — С. 76–85.
4. Бусел, М. О. Результаты численных исследований конформных антенных решеток с пониженным уровнем кроссполяризационной составляющей поля / М. О. Бусел, А. А. Калинин, А. Г. Романович // Наука и военная безопасность. — 2018. — № 1. — С. 50–54.
5. Wang, Q. An Arbitrary Conformal Array Pattern Synthesis Method Includes Mutual Coupling and Platform Effects / Q. Wang, Q.-Q. He // Progress In Electromagnetics Research — 2010. — VOL. 110. — P. 297–311.
6. Josefsson, L. Conformal array antenna theory and design / L. Josefsson, P. Persson. — New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2006. — 488 p.

УДК 330.341.1

## ТРАНСФЕР РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ: ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ, СОСТОЯНИЕ В БЕЛАРУСИ

## TRANSFER OF SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL ACTIVITIES RESULTS: INTERNATIONAL EXPERIENCE, AND SITUATION IN BELARUS

**И. В. Жук,**

зам. директора по научно-инновационной работе ГУ «БелИСА», д-р техн. наук, профессор,  
г. Минск, Республика Беларусь

**В. Ф. Иванов,**

вед. науч. сотрудник отдела научно-методического обеспечения реестров научно-технической деятельности  
ГУ «БелИСА», канд. экон. наук, доцент, г. Минск, Республика Беларусь

**I. Zhuk,**

Deputy Director for Science and Innovation of the SO "BellISA", Doctor of Engineering Sciences, Professor,  
Minsk, Republic of Belarus

**V. Ivanov,**

Leading Researcher for the Department of Scientific and Methodological Support of the Scientific and Technological  
Activities Registers of the SO "BellISA", PhD in Economics, Associate Professor, Minsk, Republic of Belarus

Дата поступления в редакцию — 31.01.2019 г.