

Капитан М.О. БУСЕЛ,  
инженер кафедры информационно-  
вычислительных систем  
Военной академии Республики Беларусь  
А.А. КАЛИНИН,  
начальник сектора НПООО «ТСП»,  
кандидат технических наук, доцент  
А.Г. РОМАНОВИЧ,  
начальник научно-исследовательского  
отдела ООО «Оборонные инициативы»,  
кандидат технических наук, доцент

# РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КОНФОРМНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЁТОК С ПОНИЖЕННЫМ УРОВНЕМ КРОССПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ПОЛЯ

*Приведены результаты сравнительного анализа диаграмм направленности конформной антенной решетки с пониженным уровнем кроссполяризованной составляющей, синтезированных с учетом поляризационных свойств излучателей, имеющих два и один вход соответственно. Результаты получены путем математического моделирования.*

УДК 621. 372. 512

Актуальность использования конформных антенных решеток (КАР) на современном этапе разработки радиотехнических систем не вызывает сомнения, о чем свидетельствует достаточно большое количество публикаций [1 – 7]. Однако в КАР из-за различной ориентации излучателей в пространстве будет возникать, наряду с основной составляющей поля, кроссполяризованная (паразитная) [1, 3, 7], компонента поля излучения, что, в свою очередь, приведет к ряду негативных факторов, таких как снижение коэффициента усиления антенны на основной составляющей поляризации, уменьшение мощности излучения на основной составляющей поля, снижение помехозащищенности радиотехнических систем и ряд других. Для снижения уровня кроссполяризованной компоненты поля разработан метод синтеза КАР с учетом поляризационных свойств излучателей [7]. В качестве одиночного элемента решетки используется модель апертурного излучателя эллиптической поляризации с заданными значениями параметров поляризации, обеспечивающая расчет двух взаимно ортогональных составляющих поля, на основе элемента Гюйгенса [8, 9]. Целью данной статьи является необходимость показать основные достоинства излучателя, имеющего два входа, относительно излучателя с одним входом, а также привести результаты численного моделирования конформной антенной решетки с линейной поляризацией для условия, что  $\varphi$ -я компонента поля принимается основной, а  $\theta$ -я – кроссполяризованной.

Излучатели КАР часто располагаются на различных выпуклых поверхностях, например, сферических, конических,

цилиндрических и других поверхностях более сложной формы. Поэтому для рассмотрения возьмем наиболее общую конструкцию – сферическую поверхность. Сферическая антенная решетка (САР) позволяет перейти к цилиндрической и конической путем фиксации направления максимального излучения в угломестной плоскости. Конструкция САР с квазигексагональным размещением излучателей представлена на рисунке 1. Она представляет собой систему из  $N$  излучателей, расположенных на поверхности радиуса  $R$ . В качестве излучателя в общем случае рассмотрим элемент Гюйгенса с эллиптической поляризацией и заданными значениями параметров поляризации [8, 9]. Возможные примеры реализации излучателей

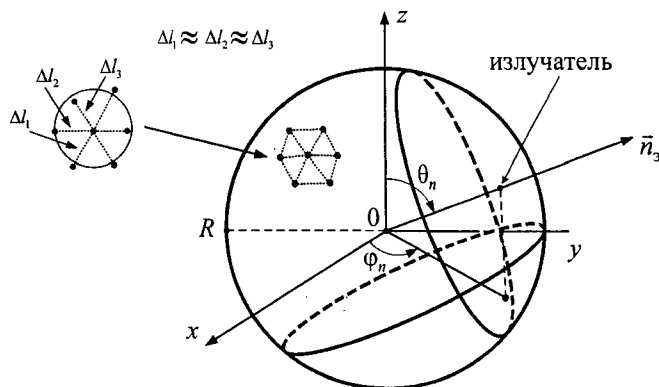


Рисунок 1. – Конструкция сферической антенной решетки

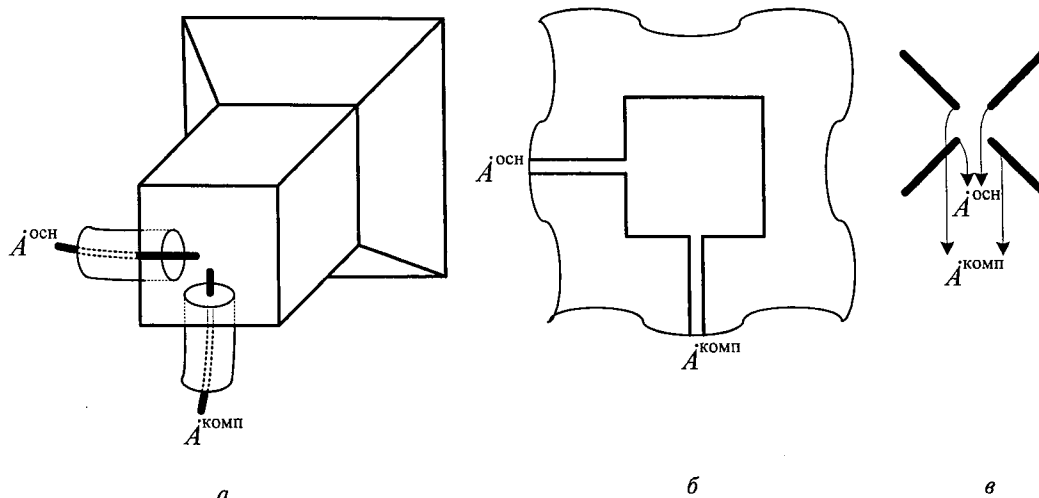


Рисунок 2. – Возможные примеры реализации излучателя с эллиптической поляризацией и заданными значениями параметров поляризации: *а* – рупорный; *б* – микрополосковый; *в* – турникетный излучатели соответственно

с эллиптической поляризацией и заданными значениями параметров поляризации изображены на рисунке 2.

В соответствии с изложенным в работе [7] методом синтеза КАР функция  $\vec{F}_{\text{ТР}}(\theta, \phi)$ , характеризующая требуемую диаграмму направленности (ДН), раскладывается в ряд Фурье по системе базисных функций, а задача синтеза КАР решается путем отыскания комплексных коэффициентов разложения  $\dot{a}_{l,s}^{\text{OCH}}$  ( $\dot{a}_{l,s}^{\text{КОМП}}$ ) и  $\dot{b}_{l,s}^{\text{OCH}}$  ( $\dot{b}_{l,s}^{\text{КОМП}}$ ):

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

где  $\dot{Z}_{l,s}^{\text{OCH}}(\theta, \phi)$  ( $\dot{Z}_{l,s}^{\text{КОМП}}(\theta, \phi)$ ),  $\dot{Z}_{l,s}^{\text{OCH}}(\theta, \phi)$  ( $\dot{Z}_{l,s}^{\text{КОМП}}(\theta, \phi)$ ) – базисные функции для основного (компенсационного) входа излучателя:

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

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

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

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

где  $F_{l\theta n}^{\text{OCH}}(\theta, \phi)$  ( $F_{l\theta n}^{\text{КОМП}}(\theta, \phi)$ ) – ДН *n*-го излучателя по  $\theta$ -й компоненте при возбуждении его основного (компенсационного) входа соответственно;  $p_n^{\theta}(\theta, \phi)$  ( $p_n^{\phi}(\theta, \phi)$ ) – проекции поляризационного вектора *n*-го излучателя на  $\theta$ -ю ( $\phi$ -ю) компоненты соответственно;  $S_{l,s}[\theta_n, \phi_n]$  ( $C_{l,s}[\theta_n, \phi_n]$ ) – функции разложения [7];  $O_n(\theta, \phi)$  – набег фазы поля *n*-го излучателя при распространении волны до точки дальней зоны; для случая сферической системы координат определяется выражением

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

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

На основании метода синтеза была исследована сферическая антенная решетка с линейной горизонтальной поляризацией с квазигексагональным размещением излучающих элементов ( $\Delta l \approx \theta, 6\lambda$ ). Радиус принят равным  $R = 9\lambda$  с активной областью, ограниченной телесным углом –  $2\theta_{\text{обл}} = 130^\circ$  и  $2\phi_{\text{обл}} = 130^\circ$ . Основной компонентой поля принята  $\phi$ -я

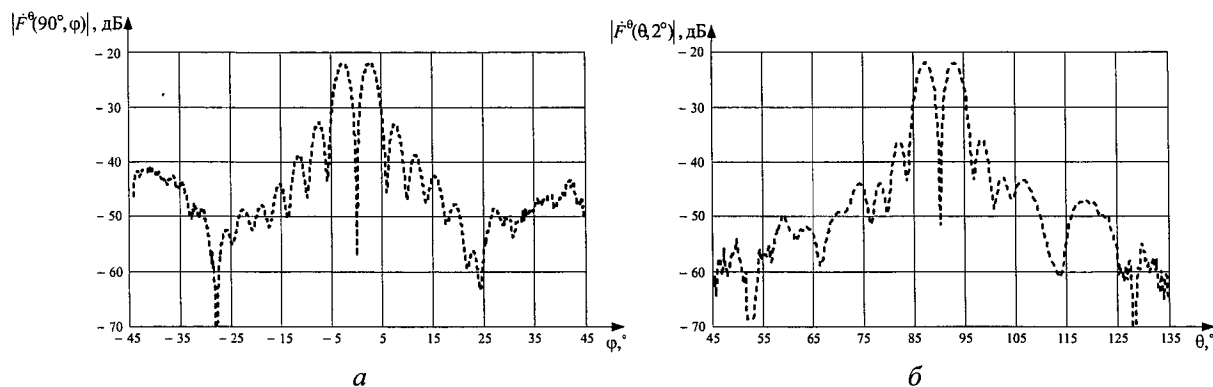


Рисунок 3. – Плоскостные кроссполяризационные ДН КАР при равномерном амплитудном распределении и фазовом распределении, компенсирующем набег фаз с учетом кривизны поверхности: *а* – плоскость  $\phi$   $F^{\phi}(90^\circ, \phi)$ ; *б* – плоскость  $\theta$   $F^{\theta}(\theta, 2^\circ)$  соответственно

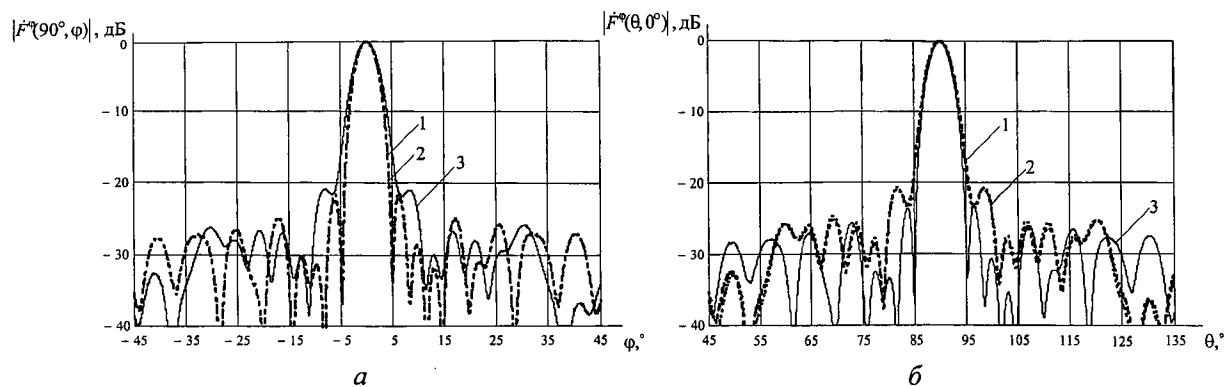


Рисунок 4. — Плоскостные ДН на основной поляризации САР с заданными параметрами  $F_B = F_{\phi B} = F_{\theta B} = -25$  дБ;  $2\theta_{0,5} (2\varphi_{0,5}) = 4^\circ$ ;  $K^{\text{КРОСС}} = -35$  дБ: *a* — плоскость  $\varphi$   $F^\varphi(90^\circ, \varphi)$ ; *б* — плоскость  $\theta$   $F^\theta(\theta, 0^\circ)$  соответственно

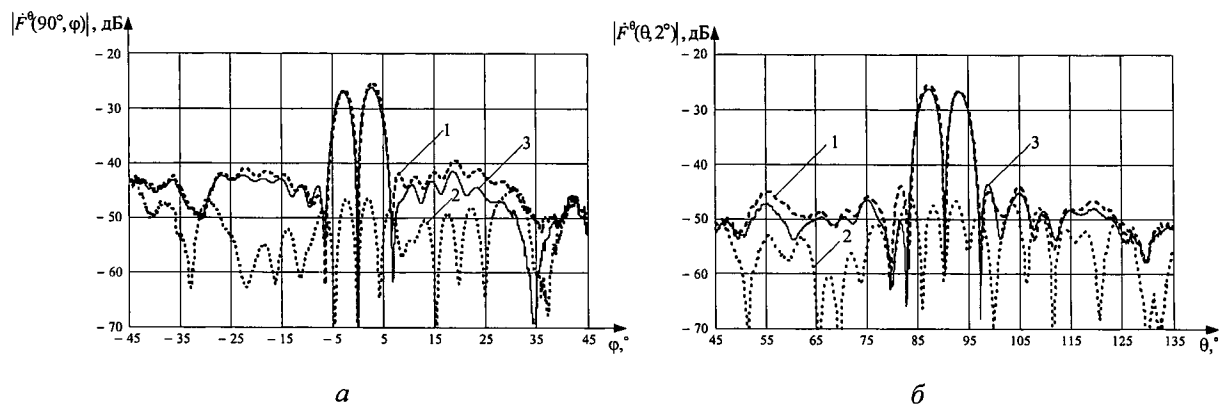


Рисунок 5. — Плоскостные кроссполяризационные ДН САР с заданными параметрами  $F_B = F_{\phi B} = F_{\theta B} = -25$  дБ;  $2\theta_{0,5} (2\varphi_{0,5}) = 4^\circ$ ;  $K^{\text{КРОСС}} = -35$  дБ: *a* — плоскость  $\varphi$   $F^\theta(90^\circ, \varphi)$ ; *б* — плоскость  $\theta$   $F^\theta(\theta, 2^\circ)$  соответственно

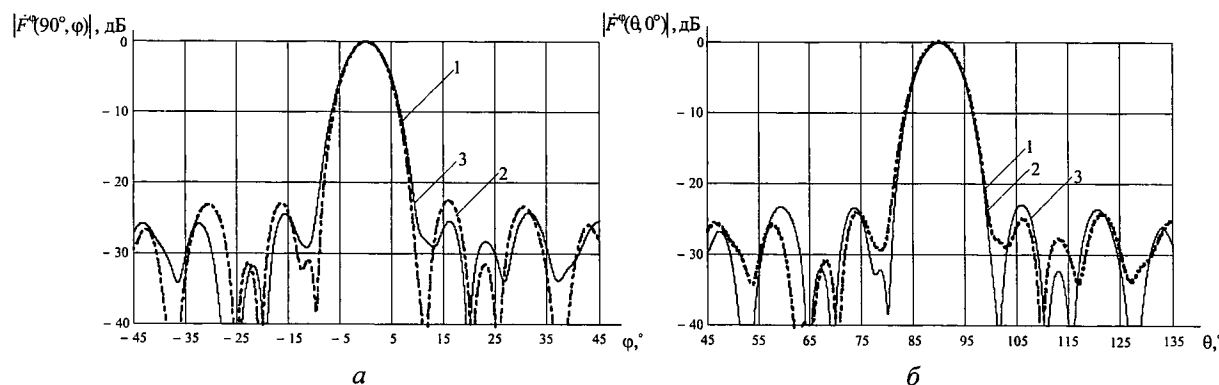


Рисунок 6. — Плоскостные диаграммы направленности на основной поляризации сферической антенной решетки с заданными параметрами  $F_B = F_{\phi B} = F_{\theta B} = -25$  дБ;  $2\theta_{0,5} (2\varphi_{0,5}) = 7^\circ$ ;  $K^{\text{КРОСС}} = -35$  дБ: *a* — плоскость  $\varphi$   $F^\varphi(90^\circ, \varphi)$ ; *б* — плоскость  $\theta$   $F^\theta(\theta, 0^\circ)$  соответственно

компонента.

Ниже рассматриваются результаты синтеза описанной антенны при различных требованиях к ее направленным свойствам. При этом проводилось сравнение ДН по основной и кроссовой составляющим поля излучения. В качестве элементов решетки использовались плоские излучатели типа элемента Гюйгенса с одним (основным) входом и с двумя взаимно ортогональными (основным и компенсационным) входами.

На рисунке 3 приведены плоскостные ДН САР при равномерном амплитудном распределении и фазовом распределении, компенсирующем набеги фаз с учетом кривизны поверхности. В качестве излучателя используется элемент Гюйгенса,

имеющий один вход [8, 9].

Плоскостные ДН САР на основной компоненте приведены на рисунке 4, плоскостные кроссполяризационные ДН САР — на рисунке 5: кривые 1 и 2 — излучатели с двумя входами, компенсационный вход не использовался и использовался, синтез проводился с учетом поляризационных свойств излучателей и с предъявлением требований к кроссовой ДН [7]; кривая 3 — излучатели с одним входом, синтез проводился без учета поляризационных свойств излучателей и без предъявления требований к кроссовой ДН решетки [5]. ДН получены в результате решения задачи синтеза [7] исходя из требований для основной ДН (по  $\varphi$ -й компоненте):

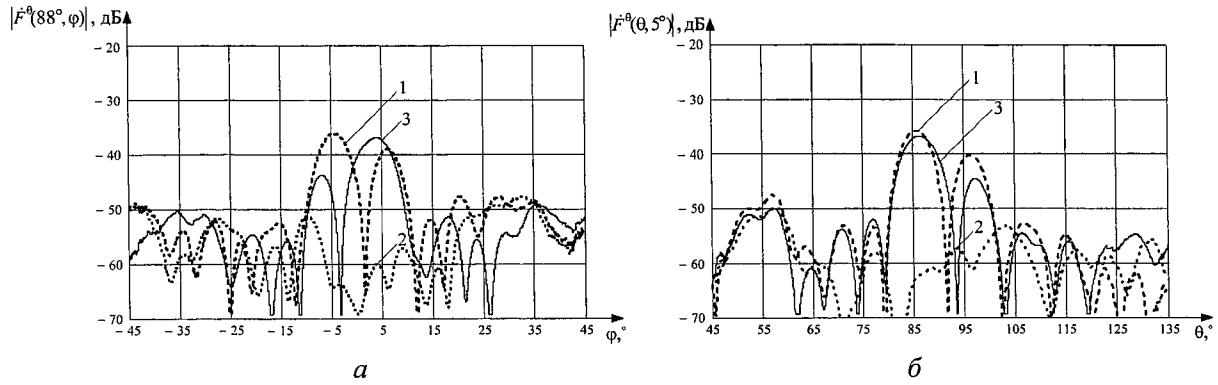


Рисунок 7. — Плоскостные кроссполяризационные ДН САР с заданными параметрами  $F_B = F_{\varphi B} = F_{\theta B} = -25$  дБ;  $2\theta_{0,5} (2\varphi_{0,5}) = 7^\circ$ ;  $K^{КРОСС} = -35$  дБ: а – плоскость  $\varphi F^q(88^\circ, \varphi)$ ; б – плоскость  $\theta F^q(\theta, 5^\circ)$  соответственно

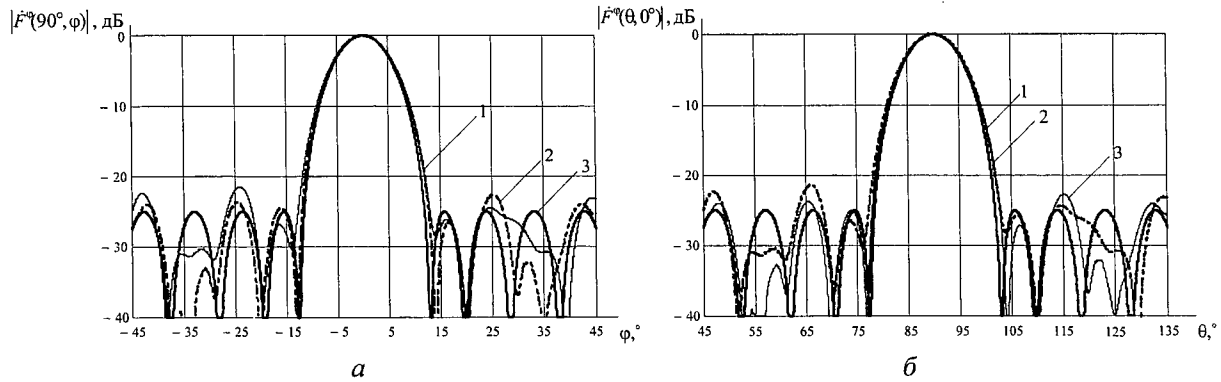


Рисунок 8. — Плоскостные диаграммы направленности на основной поляризации сферической антенной решетке с заданными параметрами  $F_B = F_{\varphi B} = F_{\theta B} = -25$  дБ;  $2\theta_{0,5} (2\varphi_{0,5}) = 10^\circ$ ;  $K^{КРОСС} = -35$  дБ: а – плоскость  $\varphi F^q(90^\circ, \varphi)$ ; б – плоскость  $\theta F^q(\theta, 0^\circ)$  соответственно

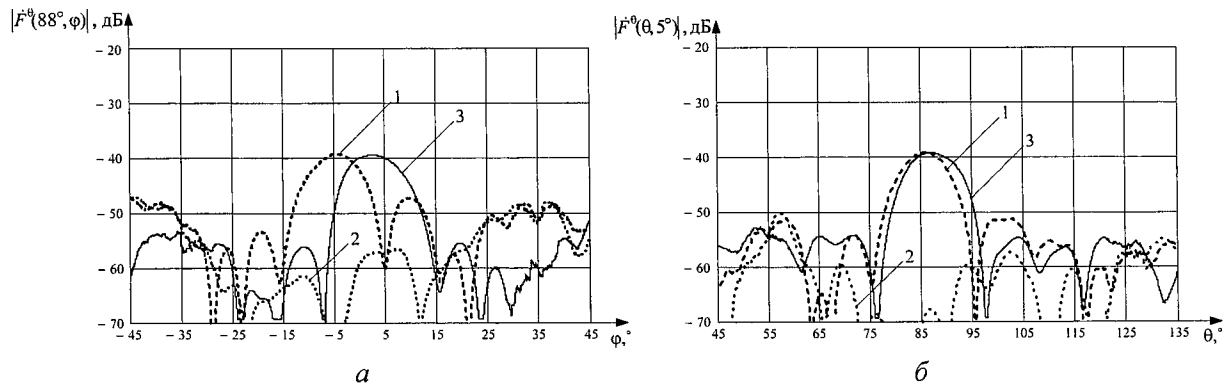


Рисунок 9. — Плоскостные кроссполяризационные ДН САР с заданными параметрами  $F_B = F_{\varphi B} = F_{\theta B} = -25$  дБ;  $2\theta_{0,5} (2\varphi_{0,5}) = 10^\circ$ ;  $K^{КРОСС} = -35$  дБ: а – плоскость  $\varphi F^q(88^\circ, \varphi)$ ; б – плоскость  $\theta F^q(\theta, 5^\circ)$  соответственно

$F_B = F_{\varphi B} = F_{\theta B} = -25$  дБ;  $2\theta_{0,5} = 4^\circ$ ;  $2\varphi_{0,5} = 4^\circ$ . Кроссполяризационная ДН не должна превышать уровень  $K^{КРОСС}(\theta, \varphi) = -35$  дБ.

На рисунках 6, 7 изображены плоскостные ДН САР для основной компоненты и кроссполяризации соответственно. ДН получены в результате решения задачи синтеза [7] исходя из требований для основной ДН (по  $\varphi$ -й компоненте):  $F_B = F_{\varphi B} = F_{\theta B} = -25$  дБ;  $2\theta_{0,5} = 7^\circ$ ;  $2\varphi_{0,5} = 7^\circ$ . Кроссполяризационная ДН не должна превышать уровень  $K^{КРОСС}(\theta, \varphi) = -35$  дБ. ДН на рисунках 6, 7 соответствуют: кривые 1 и 2 – излучатели с двумя входами, компенсационный вход не ис-

пользовался и использовался, синтез проводился с учетом поляризационных свойств излучателей и с предъявлением требований к кроссовой ДН [7], кривая 3 – излучатели с одним входом, синтез проводился без учета поляризационных свойств излучателей и без предъявления требований к кроссовой ДН решетки [5].

Плоскостные ДН САР, изображенные на рисунках 8, 9, получены в результате решения задачи синтеза [7] исходя из требований: основная ДН (по  $\varphi$ -й компоненте):  $F_B = F_{\varphi B} = F_{\theta B} = -25$  дБ;  $2\theta_{0,5} = 10^\circ$ ;  $2\varphi_{0,5} = 10^\circ$ ; кроссовая ДН не должна превышать уровень, задаваемый коэффициентом

$K^{\text{КРОСС}}(\theta, \varphi) = -35$  дБ. Изображенные на рисунках 8, 9: кривые 1 и 2 — излучатели с двумя входами, компенсационный вход не использовался и использовался, синтез проводился с учетом поляризационных свойств излучателей и с предъявлением требований к кроссовой ДН [7], кривая 3 — излучатели с одним входом, синтез проводился без учета поляризационных свойств излучателей и без предъявления требований к кроссовой ДН решетки [5].

На рисунке 9 кроссполяризационные ДН имеют несимметричные два максимума, что является следствием неравномерности разбиения сферической поверхности на гексагональную сетку и возбуждением меньшей амплитудой краевых излучателей относительно возбуждения излучателей при формировании более узких ДН и неизменной активной области решетки.

Рисунки 4, 6, 8 показывают, что для формирования ДН на основной компоненте поля САР достаточно иметь один вход у  $n$ -го излучателя. Из рисунков 3, 5, 7, 9 видно, что максимальный уровень кроссполяризационной ДН при использовании одного входа излучателя решетки в зависимости от требований к ДН на основной составляющей поляризации ограничивается  $-22...-39$  дБ. В свою очередь, введение второго входа в излучателе решетки позволяет лучше обеспечить требования по уровню кроссполяризационной компоненты поля решетки. Следовательно, возбуждение второго входа излучателя позволяет достигать более низкого уровня кроссполяризационного излучения в главном лепестке на основной составляющей поляризации  $-48...-60$  дБ. При этом наблюдается следующая закономерность — чем выше требования к ДН САР по ширине главного лепестка, тем больше выигрыш при использовании двух входов в одиночном излучателе. Для формирования узких ДН необходимо возбуждение с большей амплитудой краевых излучателей, вносящих наибольший вклад в кроссполяризационную компоненту решетки, и, как следствие, необходима компенсация данной компоненты путем возбуждения второго входа  $n$ -го излучателя.

Таким образом, в статье приведены результаты численных

исследований сферической антенной решетки с различными требованиями к векторным комплексным диаграммам направленности. Показаны примеры формирования ДН с пониженным уровнем кроссполяризационной компоненты при использовании для расчета амплитуд возбуждения метода синтеза с учетом поляризационных свойств излучателей, представленного в работе [7], и без учета поляризационных свойств излучателей — в [5]. Метод синтеза с учетом поляризационных свойств при возбуждении одного (основного) входа излучателя и метод синтеза без учета поляризационных свойств не способны сформировать ДН с пониженным уровнем кроссполяризационной компоненты. Использование метода синтеза, учитывающего поляризационные свойства при решении задачи по нахождению амплитудно-фазового распределения и возбуждению основного и компенсационного входов излучателя, позволяет формировать ДН с пониженным уровнем кроссполяризационной компоненты. Анализ приведенных результатов показал:

максимальный уровень кроссполяризационной ДН при использовании одного входа излучателя решетки ограничивается  $-22...-39$  дБ;

введение второго (ортогонального) входа в излучателе решетки позволяет достигать уровень кроссполяризационного излучения в главном лепестке на основной составляющей поляризации  $-48...-60$  дБ;

эффективность синтеза с учетом поляризационных свойств элементов КАР возрастает по мере сужения главного лепестка требуемой векторной комплексной ДН решетки на основной составляющей поляризации, что объясняется использованием всей активной поверхности решетки.

Следует отметить, что метод синтеза, описанный в [7], инвариантен как для  $\varphi$ -й, так и для  $\theta$ -й основных компонент поля излучения решетки. Проведенное моделирование показывает эффективность метода синтеза, а также необходимость использования излучателя, имеющего два входа, обеспечивающих излучение взаимно ортогональных линейно поляризованных волн.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Josefsson, L. Conformal array antenna theory and design / L. Josefsson, P. Persson. — New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2006. — 488 p.*
2. *Воскресенский, Д.И. Выпуклые сканирующие антенны / Д.И. Воскресенский, Л.И. Пономарев, В.С. Филиппов. — М.: Сов. радио, 1978. — 304 с.*
3. *Хансен, Р.С. Фазированные антенные решетки / Р.С. Хансен. — М.: Техносфера, 2012. — 560 с.*
4. *Проектирование фазированных антенных решеток / под ред. Д.И. Воскресенского. — М.: Радиотехника, 2012. — 744 с.*
5. *Бусел, М.О. Синтез конформной антенной решетки с произвольным расположением излучателей / М.О. Бусел, А.А. Калинин, А.Г. Романович // Вест. Воен. акад. Респ. Бел. — 2016. — № 2(51). — С. 87 — 94.*
6. *Бусел, М.О. Методика синтеза конформных антенных решеток с произвольным расположением излучателей / М.О. Бусел // Вест. Воен. акад. Респ. Бел. — 2017. — № 2(55). — С. 54 — 62.*
7. *Бусел, М.О. Метод синтеза конформной антенной решетки с учетом поляризационных свойств излучателей / М.О. Бусел // Доклады БГУИР. — 2017. — № 5(107). — С. 5 — 12.*
8. *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.*
9. *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.*

*Статья поступила в редколлегию 21.12.2017.*