

УДК 621.396.677

РЕЗУЛЬТАТЫ СИНТЕЗА ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ СФЕРИЧЕСКИХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК С ПОНИЖЕННЫМ УРОВНЕМ КРОССПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ КОМПОНЕНТЫ ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ

М.О. БУСЕЛ¹, А.А. КАЛИНИН², А.Г. РОМАНОВИЧ³

¹Военная академия Республики Беларусь, Республика Беларусь

²НПООО «ТСП», Республика Беларусь

³ООО «Оборонные инициативы», Республика Беларусь

Поступила в редакцию 5 декабря 2018

Аннотация. В статье приводятся результаты численного моделирования сферической антенной решетки (САР), синтезированной с учетом поляризационных свойств излучателей. Рассматривается формирование диаграмм направленности (ДН) САР с различной шириной главного лепестка и требуемыми уровнями кроссполяризации составляющей и боковых лепестков. Также в статье представлены результаты формирования ДН САР с требуемым уровнем кроссполяризации составляющей и заданной шириной главного лепестка при различных уровнях боковых лепестков.

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

Abstract. The article presents the results of numerical simulation of a spherical array synthesized taking into account the polarization properties of the emitters. The formation of a directional diagram of a spherical array with different width of the main lobe and the required levels of the cross-polarization component and side lobes is considered. The article also presents the results of the formation of directional diagrams of a spherical array with the required level of cross-polarization component and a given width of the main lobe at different levels of the side lobes.

Keywords: crosspolarization, spherical array, conformal array.

Doklady BGUIR. 2019, Vol. 119, No. 1, pp. 83-90

**The results of the synthesis of radiation patterns of the spherical arrays
with a reduced level of crosspolarization components of the radiation field**

M.O. Busel, A.A. Kalinin, A.G. Romanovich

Введение

Конформная антенная решетка – антенная решетка, излучатели которой расположены на выпуклой поверхности. Класс конформных антенных решеток наиболее представлен [1–3]. Поэтому рассматривается наиболее общая конструкция – сферическая поверхность. Одним из основных недостатков конформных решеток является возникновение наряду с основной составляющей поляризации паразитной (кроссполяризованной) [1–5]. Для снижения уровня кроссполяризованного излучения разработан метод синтеза, позволяющий учитывать требования к двум взаимно ортогональным компонентам поля излучения [4]. В качестве модели элемента решетки используется модель излучателя с заданными значениями параметров поляризации, описанная в [6]. Возможные примеры реализации излучателей с эллиптической поляризацией и заданными значениями параметров поляризации представлены в работе [5]. Размещение излучателей на поверхности САР может быть в узлах прямоугольной или гексагональной сетки. Процесс разбиения сферической поверхности является достаточно сложной задачей [3], которая опускается в данной работе. Наиболее равномерное размещение излучателей на конформной поверхности обеспечивается в узлах гексагональной сетки.

Математическая модель сферической антенной решетки с учетом поляризационных свойств излучателей

В статье рассматривается САР с линейной вертикальной поляризацией (θ -я основная, φ -я кроссполяризационная). Конструкция антенной решетки с квазигексагональным размещением излучателей представлена на рис. 1. Она представляет собой систему из N излучателей, расположенных на сферической поверхности радиуса R .

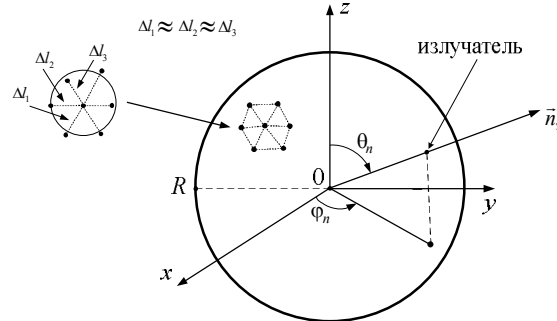


Рис. 1. Конструкция сферической антенной решетки

Математическая модель САР с учетом поляризационных свойств излучателей, позволяющая производить расчет двух взаимно ортогональных компонент поля излучения, имеет вид:

$$\dot{F}^{\theta}(\theta, \varphi) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \dot{A}_n F_{1n}^{\theta}(\theta, \varphi) e^{i O_n(\theta, \varphi)}; \quad (1)$$

$$\dot{F}^{\varphi}(\theta, \varphi) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \dot{A}_n F_{1n}^{\varphi}(\theta, \varphi) e^{i O_n(\theta, \varphi)}, \quad (2)$$

где \dot{A}_n – комплексная амплитуда возбуждения n -го излучателя САР, получена на основании [4]; $F_{1n}^{\theta}(\theta, \varphi)$ ($F_{1n}^{\varphi}(\theta, \varphi)$) – θ -я (φ -я) составляющая ДН n -го излучателя [6]; $O_n(\theta, \varphi)$ – набег фазы поля n -го излучателя при распространении волны до точки дальней зоны.

Результаты численного моделирования

1. Формирование ДН САР с требуемыми уровнями кроссполяризационной составляющей и боковых лепестков с различной шириной главного лепестка.

Был проведен синтез и получены результаты ДН САР с заданной шириной главного лепестка и постоянными значениями уровня бокового излучения на основной составляющей поляризации и уровня кроссполяризационного излучения антенной решетки. Для оценки параметров и большей наглядности приведены различные ДН, как плоскостные, так и объемные. В качестве параметров требуемых ДН с различной шириной главного лепестка ($2\varphi_{0,5}(2\theta_{0,5}) = 5^\circ$, $2\varphi_{0,5}(2\theta_{0,5}) = 10^\circ$ и $2\varphi_{0,5}(2\theta_{0,5}) = 15^\circ$) задавались фиксированные уровни бокового излучения на основной составляющей поляризации $F_B = -25$ дБ и кроссполяризационной составляющей $K^{\text{КРОСС}} = -35$ дБ. На рис. 2, 4, 6 приведены объемные ДН САР для двух взаимно ортогональных составляющих поля излучения. Для оценки уровня бокового излучения на основной составляющей поля, а также ширины главного лепестка ДН САР удобно использовать плоскостные ДН, представленные на рис. 3, 5, 7.

Объемные ДН САР на рис. 2, 4, 6 свидетельствуют о практически полном выполнении требований, предъявляемых к заданным ДН САР. Диаграммы направленности, изображенные на рис. 3, 5, 7: кривая 1 – требуемая ДН, кривая 2 – результат синтеза, кривая 3 – кроссполяризационная ДН САР, полученная при возбуждении только одного входа n -го излучателя равномерным амплитудным распределением и фазовым распределением учитывающем кривизну поверхности [5].

В качестве параметров требуемых ДН с различной шириной главного лепестка ($2\varphi_{0,5}(2\theta_{0,5}) = 5^\circ$, $2\varphi_{0,5}(2\theta_{0,5}) = 10^\circ$ и $2\varphi_{0,5}(2\theta_{0,5}) = 15^\circ$) задавались требуемые уровни бокового излучения на основной составляющей поляризации $F_B = -25$ дБ и кроссполяризационной составляющей $K^{\text{КРОСС}} = -35$ дБ. При сравнении ДН САР результатов синтеза по основным компонентам и требуемых ДН САР среднеквадратические меры близости – $\sigma_2 \approx 2,1 \times 10^{-3}$

($2\varphi_{0,5}(2\theta_{0,5}) = 5^\circ$); $\sigma_2 \approx 3,9 \times 10^{-3}$ ($2\varphi_{0,5}(2\theta_{0,5}) = 10^\circ$); $\sigma_2 \approx 8,1 \times 10^{-3}$ ($2\varphi_{0,5}(2\theta_{0,5}) = 15^\circ$). Максимально допустимый уровень кроссполяризационной компоненты САР в $K^{\text{КРОСС}}(\theta, \varphi) = -35$ дБ для всех трех ДН выполнен полностью.

Приведенные плоскостные ДН показывают довольно хорошее совпадение требуемой ДН и ДН, полученной в результате синтеза. Ширина главного лепестка по основной компоненте поля во всех ДН по уровню -3 дБ полностью соответствует требуемой. Небольшое превышение уровня бокового излучения, что составляет не более 4 дБ, возникает вследствие неравномерности разбиения сферической поверхности на квазигексагональную сетку, а также необходимости учета требований как по основной, так и по кроссполяризационной компонентам поля решетки.

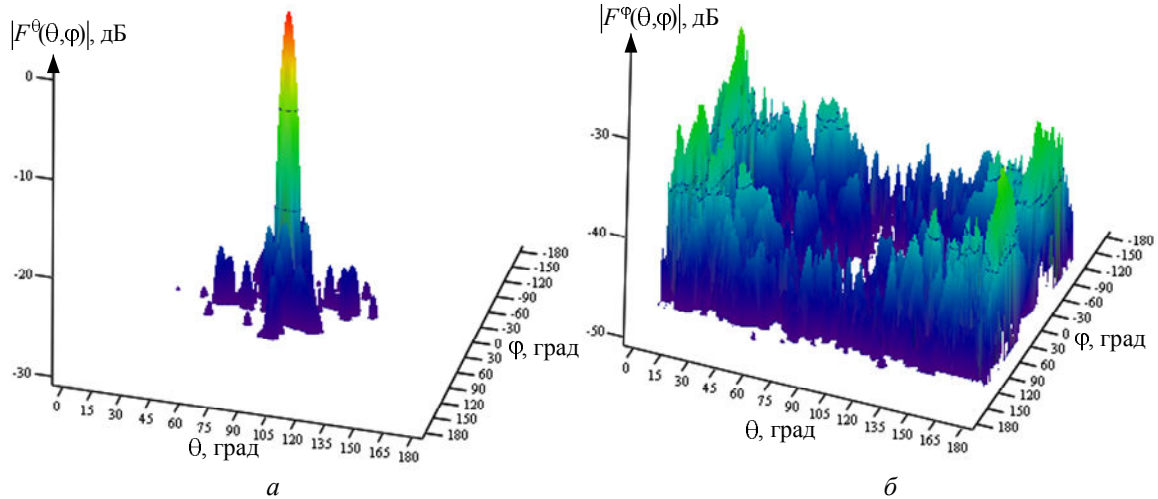


Рис. 2. Объемные ДН САР с заданными параметрами $F_B = F_{\varphi B} = F_{\theta B} = -25$ дБ; $2\theta_{0,5}(2\varphi_{0,5}) = 5^\circ$; $K^{\text{КРОСС}} = -35$ дБ: *а* – график поверхности по θ -й компоненте (основная компонента); *б* – график поверхности по φ -й компоненте (кроссполяризационная компонента)

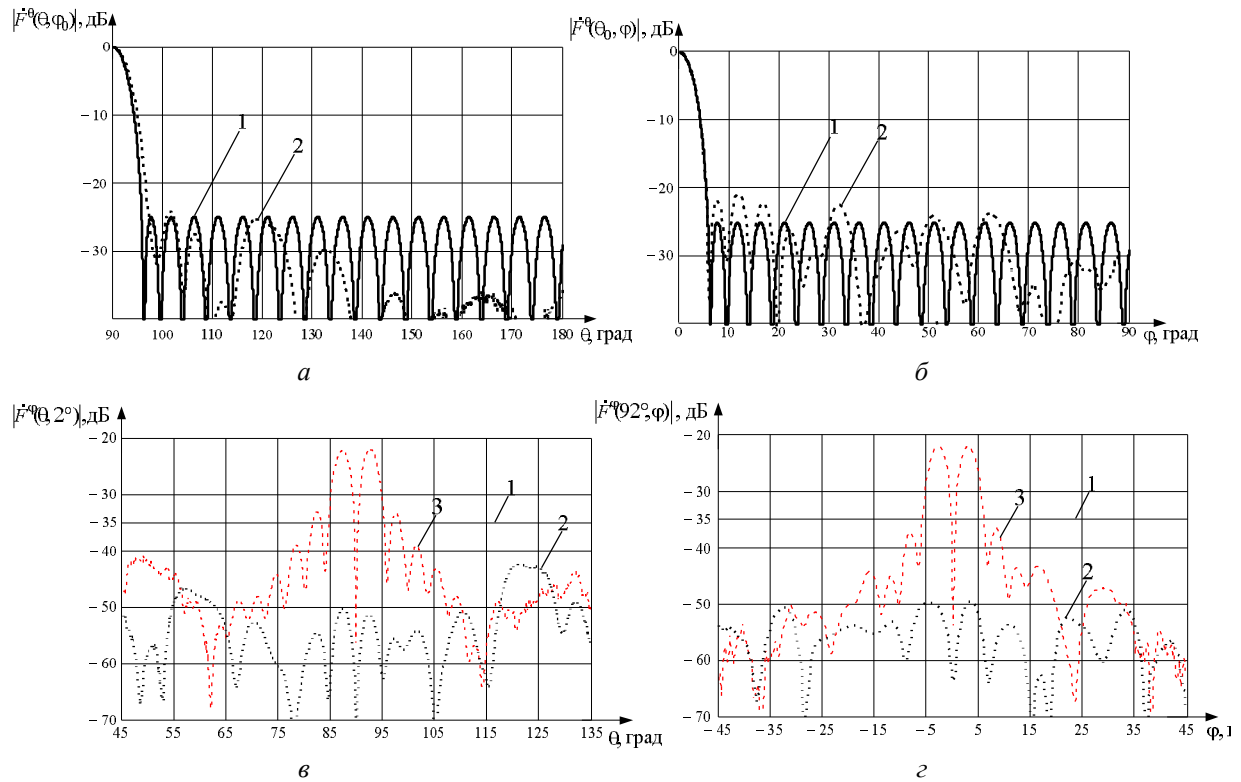


Рис. 3. Плоскостные ДН САР с заданными параметрами $F_B = F_{\varphi B} = F_{\theta B} = -25$ дБ; $2\theta_{0,5}(2\varphi_{0,5}) = 5^\circ$; $K^{\text{КРОСС}} = -35$ дБ: *а, в* – плоскость $\theta F^0(\theta, \varphi_0)$, $F^0(\theta, 2^\circ)$; *б, г* – плоскость $\varphi F^0(\theta_0, \varphi)$, $F^0(92^\circ, \varphi)$

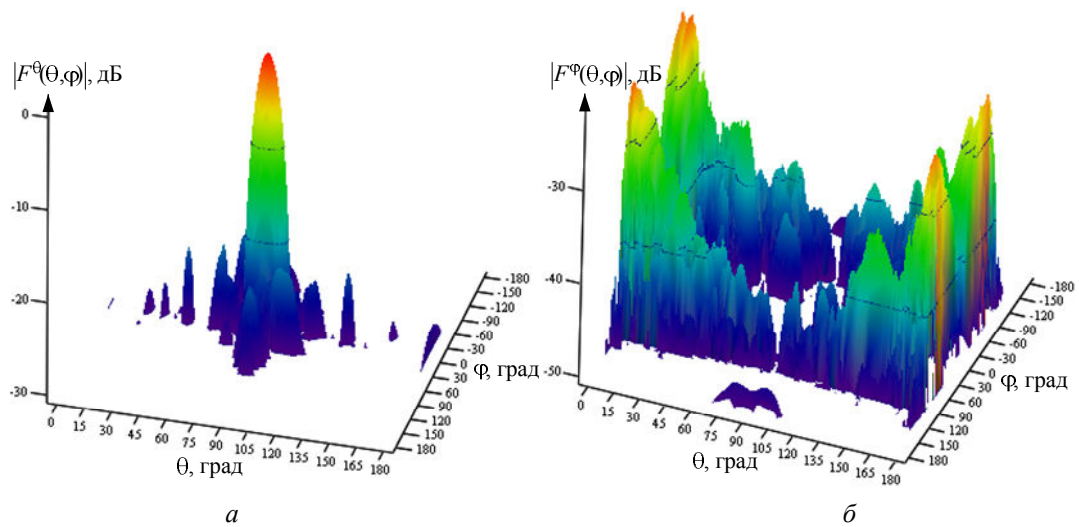


Рис. 4. Объемные ДН САР с заданными параметрами $F_{\text{Б}} = F_{\text{ФБ}} = F_{\text{ФБ}} = -25$ дБ; $2\theta_{0,5}(2\varphi_{0,5}) = 10^\circ$; $K^{\text{КРОСС}} = -35$ дБ: *а* – график поверхности по θ -й компоненте (основная компонента); *б* – график поверхности по φ -й компоненте (кроссполяризация компонента)

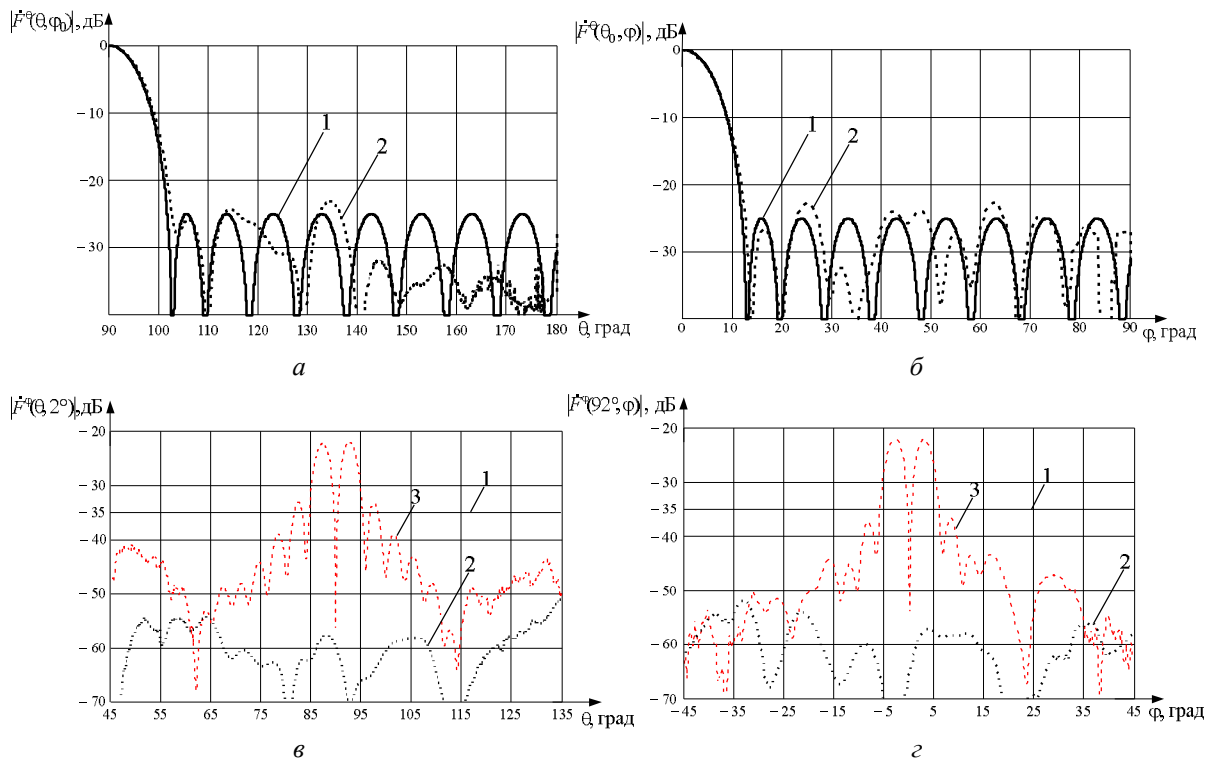


Рис. 5. Плоскостные ДН САР с заданными параметрами $F_{\text{Б}} = F_{\text{ФБ}} = F_{\text{ФБ}} = -25$ дБ; $2\theta_{0,5}(2\varphi_{0,5}) = 10^\circ$; $K^{\text{КРОСС}} = -35$ дБ: *а, в* – плоскость θ $F^{\theta}(\theta, \varphi_0)$, $F^{\theta}(\theta, 20^\circ)$; *б, г* – плоскость φ $F^{\phi}(\theta_0, \varphi)$, $F^{\phi}(92^\circ, \varphi)$

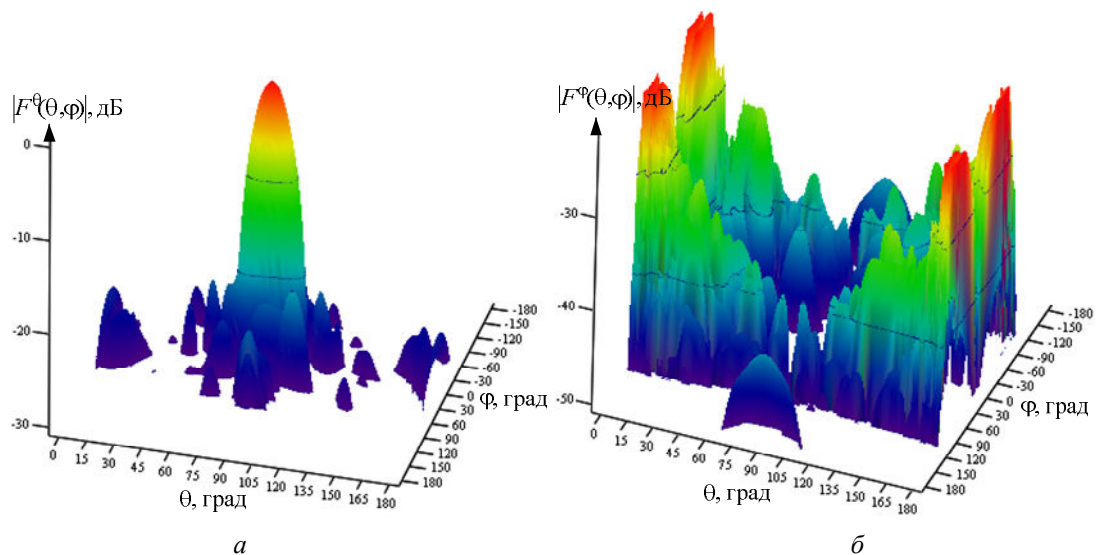


Рис. 6. Объемные ДН САР с заданными параметрами $F_B = F_{\phi B} = F_{\theta B} = -25$ дБ; $2\theta_{0,5}(2\phi_{0,5}) = 15^\circ$; $K^{КРОСС} = -35$ дБ: а – график поверхности по θ -й компоненте (основная компонента); б – график поверхности по ϕ -й компоненте (кроссполяризационная компонента)

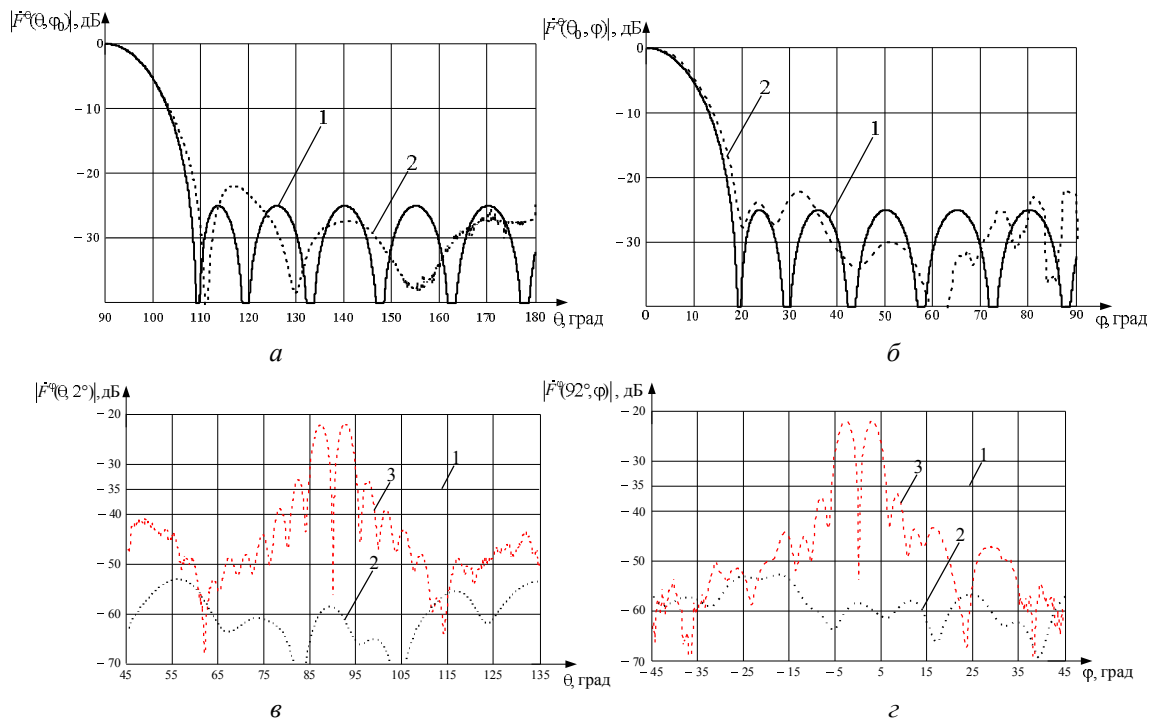


Рис. 7. Плоскостные ДН САР с заданными параметрами $F_B = F_{\phi B} = F_{\theta B} = -25$ дБ; $2\theta_{0,5}(2\phi_{0,5}) = 15^\circ$; $K^{КРОСС} = -35$ дБ: а, в – плоскость θ $F^0(\theta, \phi_0)$, $F^\phi(\theta, 2^\circ)$, $F^\theta(\theta, \phi_0)$; б, г – плоскость ϕ $F^\phi(\theta_0, \phi)$, $F^\phi(92^\circ, \phi)$

Формирование ДН САР с требуемым уровнем кроссполяризационной составляющей и шириной главного лепестка при различных уровнях боковых лепестков

Был проведен синтез и получены результаты ДН САР с фиксированной шириной главного лепестка $2\theta_{0,5}(2\phi_{0,5}) = 10^\circ$ и постоянным уровнем кроссполяризационной составляющей $K^{КРОСС} = -35$ дБ с различным уровнем бокового излучения ($F_B = -20$ дБ, $F_B = -25$ дБ, $F_B = -30$ дБ) на основной составляющей поля антенны. Результаты выполненных исследований представлены на рис. 8–10. На рис. 8–10: кривая 1 – требуемая ДН, кривая 2 – результат синтеза, кривая 3 – кроссполяризационная ДН при равномерном амплитудном распределении и фазовом распределении, учитывающем кривизну поверхности при возбуждении только одного входа n -го излучателя.

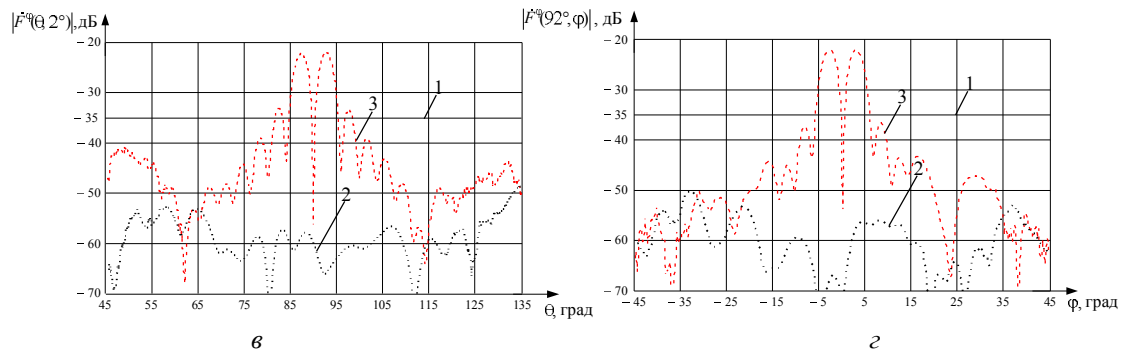
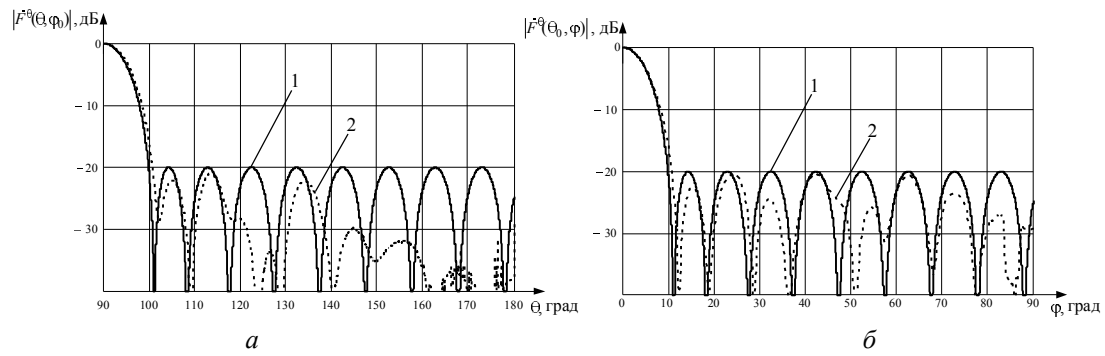


Рис. 8. Плоскостные ДН САР с заданными параметрами $F_B = F_{\Phi B} = F_{\theta B} = -20$ дБ; $2\theta_{0,5} (2\varphi_{0,5}) = 10^\circ$; $K^{\text{КРОСС}} = -35$ дБ: а, в – плоскость $\theta F^0(\theta, \varphi_0)$, $F^0(\theta, 2^\circ)$; б, з – плоскость $\varphi F^0(\theta_0, \varphi)$, $F^0(92^\circ, \varphi)$

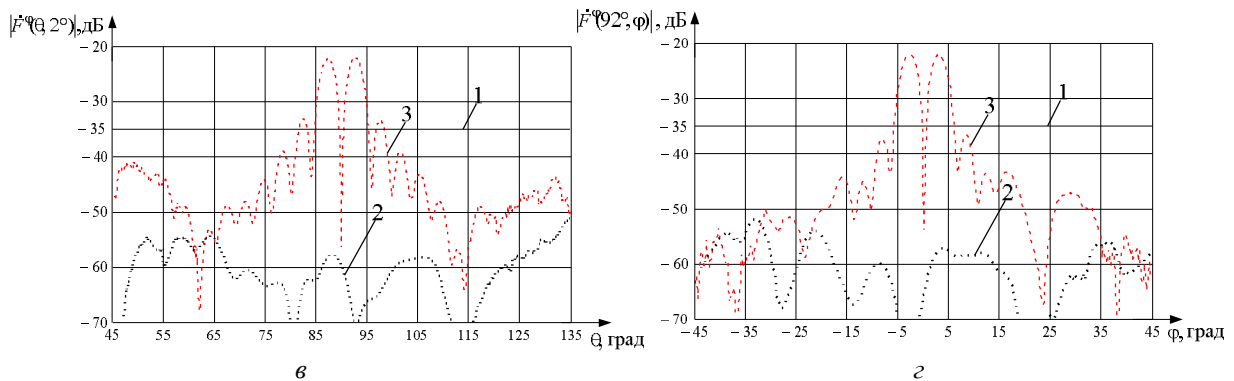
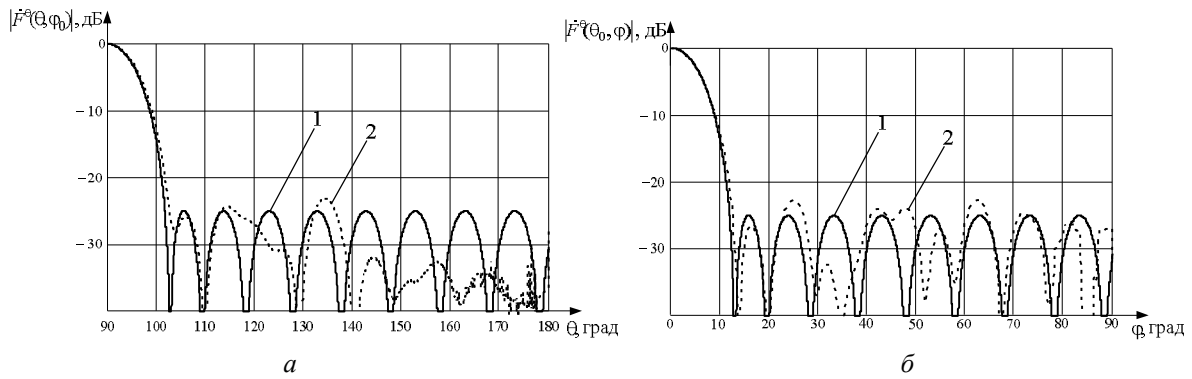


Рис. 9. Плоскостные ДН САР с заданными параметрами $F_B = F_{\Phi B} = F_{\theta B} = -25$ дБ; $2\theta_{0,5} (2\varphi_{0,5}) = 10^\circ$; $K^{\text{КРОСС}} = -35$ дБ: а, в – плоскость $\theta F^0(\theta, \varphi_0)$, $F^0(\theta, 2^\circ)$; б, з – плоскость $\varphi F^0(\theta_0, \varphi)$, $F^0(92^\circ, \varphi)$

Представленные рис. 8–10 показывают, что ширина главного лепестка ДН САР по основной компоненте поля излучения практически воспроизводит требуемую ширину главного лепестка ДН по основной компоненте, среднеквадратические меры близости – $\sigma_2 \approx 5,9 \times 10^{-3}$ ($F_B = -20$ дБ); $\sigma_2 \approx 3,9 \times 10^{-3}$ ($F_B = -25$ дБ); $\sigma_2 \approx 3,8 \times 10^{-3}$ ($F_B = -30$ дБ). Требования по максимальному уровню кроссполаризационной компоненте в -35 дБ выполнены полностью. Однако требования по обеспечению заданного уровня бокового излучения на основной составляющей поля сферической антенной решетки выполняются не в полной мере (таблица).

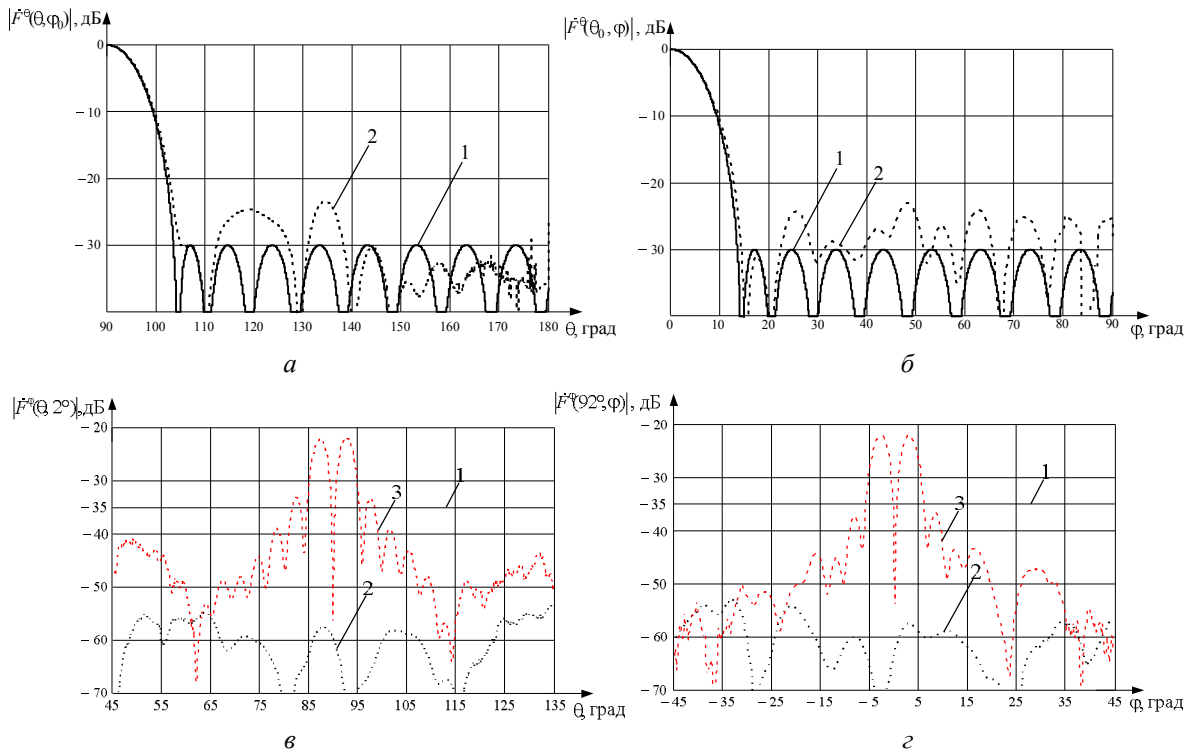


Рис. 10. Плоскостные ДН САР с заданными параметрами $F_{\text{Б}} = F_{\text{ФБ}} = F_{\text{ФБ}} = -30$ дБ; $2\theta_{0,5}(2\varphi_{0,5}) = 10^\circ$; $K^{\text{КРОСС}} = -35$ дБ: а, в – плоскость θ $F^0(\theta, \varphi_0)$, $F^0(\theta, 2^\circ)$; б, г – плоскость φ $F^0(\theta_0, \varphi)$, $F^0(92^\circ, \varphi)$

Требуемый и достигнутый по результатам синтеза уровень бокового излучения на основной компоненте поля излучения сферической антенной решетки

| Требуемый $F_{\text{Б}}$ | -20 дБ | -25 дБ | -30 дБ |
|---|--------|--------|--------|
| Достигнутый по результатам синтеза $F_{\text{Б}}$ | -20 дБ | -23 дБ | -24 дБ |

Заключение

Рассмотрено формирование ДН САР с различной шириной главного лепестка и требуемыми уровнями кроссполяризационной составляющей и боковых лепестков. На примере синтеза САР с различной шириной главного лепестка показано, что метод синтеза, описанный в [4], обеспечивает практически полное выполнение требований по кроссовой составляющей поля излучения при незначительном ухудшении параметров ДН на основной поляризации. Так, например, уровень кроссполяризационного излучения в направлении главного лепестка снижается на 27–36 дБ по сравнению с ДН антенной решетки, имеющей равномерное амплитудное распределение и фазовое распределение, учитывающее кривизну сферической поверхности. При этом наблюдается незначительное расширение главного лепестка (менее 1 %) и повышение уровня бокового излучения (менее 3 дБ) ДН по основной компоненте. В качестве требуемых значений параметров ДН с различной шириной главного лепестка ($2\varphi_{0,5}(2\theta_{0,5}) = 5^\circ$, $2\varphi_{0,5}(2\theta_{0,5}) = 10^\circ$ и $2\varphi_{0,5}(2\theta_{0,5}) = 15^\circ$) задавались фиксированные уровни бокового излучения на основной составляющей поляризации $F_{\text{Б}} = -25$ дБ и кроссполяризационной составляющей $K^{\text{КРОСС}} = -35$ дБ.

Рассмотрено формирование ДН САР с требуемым уровнем кроссполяризационной составляющей и заданной шириной главного лепестка ДН антенной решетки при различных уровнях боковых лепестков. Метод синтеза, описанный в главе [4] на примере синтеза САР с различными уровнями боковых излучений на основной составляющей поляризации, демонстрирует практически полное выполнение требований по кроссовой составляющей поля излучения при незначительном ухудшении параметров ДН на основной поляризации. Так, например, уровень кроссполяризационного излучения в направлении главного лепестка снижается на 24–36 дБ в сравнении с антенной решеткой, имеющей равномерное амплитудное распределение и фазовое распределение, учитывающее кривизну сферической поверхности.

При этом наблюдается незначительное расширение главного лепестка (менее 1 %) и повышение уровня бокового излучения: менее 0,5 дБ для $F_B = -20$ дБ, менее 2 дБ для $F_B = -25$ дБ, менее 6 дБ для $F_B = -30$ дБ по основной компоненте. В качестве требуемых параметров ДН с фиксированной шириной главного лепестка $2\varphi_{0,5}(2\theta_{0,5}) = 10^\circ$ задавался постоянный уровень кроссполаризационной составляющей $K^{KPOCC} = -35$ дБ при различных уровнях бокового излучения ($F_B = -20$ дБ, $F_B = -25$ дБ, $F_B = -30$ дБ) на основной составляющей поля антенны.

Список литературы

1. Josefsson, L., Persson P. Conformal array antenna theory and design. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2006. 488 p.
2. Воскресенский Д.И., Пономарев Л.И., Филиппов В.С. Выпуклые сканирующие антенны. М.: Сов. радио, 1978. 304 с.
3. Хансен Р.С. Фазированные антенные решетки. М.: Техносфера, 2012. 560 с.
4. Бусел М.О. Метод синтеза конформной антенной решетки с учетом поляризационных свойств излучателей // Докл. БГУИР. 2017. № 5 (107). С. 5–12.
5. Бусел М.О., Калинин А.А., Романович А.Г. Результаты численных исследований конформных антенных решеток с пониженным уровнем кроссполаризационной составляющей поля // Наука и воен. безопасность. 2018. № 1. С. 50–54.
6. Бусел М.О., Калинин А.А., Романович А.Г. Математическая модель излучателя конформной антенной решетки с учетом его поляризационных свойств // Сб. науч. ст. Воен. акад. Респ. Бел. 2016. № 30. С. 86–95.

References

1. Josefsson, L., Persson P. Conformal array antenna theory and design. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2006. 488 p.
2. Voskresenskij D.I., Ponomarev L.I., Filippov V.S. Vypuklye skanirujushhie anteny. M.: Sov. radio, 1978. 304 s. (in Russ.)
3. Hansen R.S. Fazirovannyye antennoye reshetki. M.: Tehnosfera, 2012. 560 s. (in Russ.)
4. Busel M.O. Metod sinteza konformnoj antennoj reshetki s uchetom poljarizacionnyh svojstv izluchatelej // Dokl. BGUIR. 2017. № 5 (107). S. 5–12. (in Russ.)
5. Busel M.O., Kalinin A.A., Romanovich A.G. Rezul'taty chislennyh issledovanij konformnyh antennyh reshetok s ponizhennym urovnem krosspoljarizacionnoj sostavljajushhej polja // Nauka i voen. bezopasnost'. 2018. № 1. S. 50–54. (in Russ.)
6. Busel M.O., Kalinin A.A., Romanovich A.G. Matematicheskaja model' izluchatelja konformnoj antennoj reshetki s uchetom ego poljarizacionnyh svojstv // Sb. nauch. st. Voен. akad. Resp. Bel. 2016. № 30. S. 86–95. (in Russ.)

Сведения об авторах

Бусел М.О., инженер кафедры информационно-вычислительных систем Военной академии Республики Беларусь.

Калинин А.А., к.т.н, доцент, начальник сектора СКБ-4 НПООО «ТСП».

Романович А.Г., к.т.н, доцент, начальник научно-исследовательского отдела ООО «Оборонные инициативы».

Information about the authors

Busel M.O., the engineer of chair of information and computing systems of Military academy Republic of Belarus.

Kalinin A.A., PhD, associate professor, head of scientific research sector SKB-4 of NPOOO «TSP».

Romanovich A.G., PhD, associate professor, head of scientific research department of ООО «Oboronnie initsiativi».

Адрес для корреспонденции

220057, Республика Беларусь,
г. Минск, пр-т Независимости, 220,
Военная академия Республики Беларусь
тел. +375-29-571-76-88;
e-mail: mischabox@yandex.by
Бусел Михаил Олегович

Address for correspondence

220057, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosty ave., 220,
Military academy Republic of Belarus
tel. +375-29-571-76-88;
e-mail: mischabox@yandex.by
Busel Mikhail Olegovitch